

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO NUMÉRICO DE IMPACTOS EQUIENERGÉTICOS SOBRE TANQUES LLENOS DE FLUÍDO

AUTOR: Raúl Fernández Hernando

TUTOR: David Varas Doval

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

TRIBUNAL

PRESIDENTE: Levenfeld Laredo, Belén

SECRETARIO: Monge Alcázar, Miguel Ángel

VOCAL: Zahr Viñuela, Jorge Alonso

AGRADECIMIENTOS

Por un lado me gustaría agradecer a mi tutor, David, la oportunidad que me ha brindado de realizar mi Trabajo Fin de Grado con él, aparte de la ayuda y el tiempo que ha invertido en mí.

Por otro lado, dar las gracias a mi familia, mis amigos y mis compañeros, que al final también se han convertido en amigos, porque con ellos todo este recorrido se ha hecho más ameno. Y a todos ellos en conjunto por haberme aguantado en esos momentos que me sobrepasaba el trabajo y estaba de peor humor porque ellos conseguían devolverme la sonrisa, y conseguían que no me viniese abajo y no me alejase de este objetivo, que hoy se ha culminado.

A todos muchísimas, Gracias.

ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS	1
INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE GRÁFICAS	4
I. RESUMEN	6
II. ABSTRACT	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 CONTENIDO	11
1.4 SISTEMA DE COMBUSTIBLE	12
1.4.1 TANQUES DE COMBUSTIBLE DE AVIÓN	12
1.4.2 GEOMETRÍA DEL ALA DEL AVIÓN	15
1.5 IMPACTOS SOBRE TANQUES CON FLUIDO EN EL INTERIOR (GOLPE HIDRODINÁMICO) ..	16
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1 INTRODUCCIÓN	21
2.2 ESTUDIOS REALIZADOS	21
2.2.1 ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	21
2.2.2 ESTUDIOS NUMÉRICOS	25
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)	27
2.3.1 INTRODUCCIÓN	27
2.3.2 ANÁLISIS EN SÓLIDOS ELÁSTICOS MEDIANTE EL FEM.....	29
2.3.3 RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS NO LINEALES MEDIANTE EL FEM	32
2.3.4 LS-DYNA.....	33
2.3.5 TIPOS DE FORMULACIONES EXISTENTES	34
CAPÍTULO 3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA.....	43
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	44
3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	45
3.2.1 GEOMETRÍA	45
3.2.2 MATERIALES	49
3.2.3 CONTACTOS.....	55
3.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO	55

3.2.5 TIEMPO DE SIMULACIÓN	57
3.3 VALIDACIÓN NUMÉRICA	57
3.4 CASOS ANALIZADOS	57
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	59
4.1 INTRODUCCIÓN	60
4.2 RESULTADOS	60
4.2.1 FASES GOLPE HIDRODINÁMICO	60
4.2.2 VELOCIDAD Y POSICIÓN DEL PROYECTIL	65
4.2.3 PRESIONES EN EL FLUIDO	68
4.2.4 DESPLAZAMIENTOS DE LAS PAREDES	71
4.2.5 ENERGÍAS CINÉTICAS DEL SISTEMA.....	85
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	89
5.1 CONCLUSIONES	90
5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	92
III. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Golpes de granizo sobre ala de un avión	9
Figura 1.2 Impacto de fuselaje en ala y turbinas (Izda.). Impacto de ave sobre el ala (Drcha.) ...	9
Figura 1.3 Depósito rígido	12
Figura 1.4 Una pareja de cazas Saab 39 Gripen con 3 depósitos externos cada uno	13
Figura 1.5 Tanque elástico de aeronave	13
Figura 1.6 Esquema de depósito integrado	14
Figura 1.7 Distribución de tanques de combustible.....	14
Figura 1.8 Partes del ala de un avión	16
Figura 1.9 Fase de choque.....	18
Figura 1.10 Fase resistente	18
Figura 1.11 Fase de cavitación	19
Figura 1.12 Fase de salida	19
Figura 2.1 Discretización (Izqda.) y Partes de un sistema (Drcha.)	28
Figura 2.2 Método de Newton-Raphson.....	33
Figura 2.3 Método Lagrangiano	35
Figura 2.4 Cinemática Lagrangiana	36
Figura 2.5 Método Euleriano.....	37
Figura 2.6 Tanque en movimiento lleno de fluido, simulado mediante SPH.....	38
Figura 2.7 Descripción ALE	39
Figura 2.8 Descripción de la cinemática del método ALE.	40
Figura 2.9 Algoritmo de acoplamiento.....	41
Figura 2.10 Compartición y superposición de las mallas	42
Figura 3.1 Fotografía del modelo experimental.....	45
Figura 3.2 Esquema del modelo con medidas	45
Figura 3.3 Componentes del modelo seccionado por la mitad.	46
Figura 3.4 Simetría en el plano YZ (Drcha.). Simetría en el plano XZ (Izqda.).	46
Figura 3.5 Plano acotado de tanque aluminio.	47
Figura 3.6 Mallado de las paredes de entrada y salida.....	47
Figura 3.7 Mallado paredes laterales.....	48
Figura 3.8 Proyectoil esférico mallado (Izqda.). Proyectoil con deposito al 75% de agua, un plano de simetría (Central). Proyectoil con deposito al 100% de agua, dos planos de simetría (Drcha.).	48
Figura 3.9 Contacto proyectoil- pared de entrada.....	55
Figura 3.10 Proyectoil de plomo impactando y sufriendo pérdida de material.	58

Figura 4.1 Fase de choque para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).....	61
Figura 4.2 Fase de choque para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).....	61
Figura 4.3 Fase resistente para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).....	62
Figura 4.4 Fase resistente para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).....	62
Figura 4.5 Fase de cavitación para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).....	63
Figura 4.6 Fase de cavitación para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%).....	63
Figura 4.7 Fase de salida para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).....	64
Figura 4.8 Fase de salida para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).....	64
Figura 4.9 Deformación tanque al 100% (Izqda.) y al 75% (Drcha.).....	72
Figura 4.10 Pared de entrada en dirección transversal del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.	72
Figura 4.11 Pared de entrada en dirección transversal del tanque llenado al 75% cortado a un medio.	73
Figura 4.12 Pared de entrada lo largo del tanque llenado al 100% cortado a un medio.	74
Figura 4.13 Pared de entrada lo largo del tanque llenado al 75% cortado a un medio..	75
Figura 4.14 Pared media de salida del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.....	76
Figura 4.15 Pared media de salida del tanque llenado al 75% cortado a un medio.....	77
Figura 4.16 Pared superior media del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.	78
Figura 4.17 Pared superior media del tanque llenado al 75% cortado a medio.....	78
Figura 4.18 Pared superior a lo largo del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.....	80
Figura 4.19 Pared superior a lo largo del tanque llenado al 75% cortado a un medio.....	80
Figura 4.20 Pared inferior media del tanque llenado al 75% cortado a un medio.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Dimensiones del tanque.....	47
Tabla 3.2 Dimensiones del proyectil.	48
Tabla 3.3 Propiedades del Al 6063-T5.....	49
Tabla 3.4 Parámetros ecuación de Johnson-Cook.	50
Tabla 3.5 Coeficientes EOS Linear Polynomial (Al 6063-T5).	50
Tabla 3.6 Propiedades de la ventana de PMMA.	50
Tabla 3.7 Propiedades del acero.	51
Tabla 3.8 Propiedades del WHA [31].	51
Tabla 3.9 Parámetros de Johnson-Cook para la aleación de Tungsteno (WHA).....	51
Tabla 3.10 Parámetros para cálculo de ε_f de la aleación de Tungsteno (WHA).....	51
Tabla 3.11 Coeficientes EOS Linear Polynomial (WHA).	52
Tabla 3.12 Propiedades del titanio.	52
Tabla 3.13 Propiedades del titanio.	52
Tabla 3.14 Propiedades del agua.	53
Tabla 3.15 Parámetros de Gruneisen del agua.	54
Tabla 3.16 Propiedades del agua.	54
Tabla 3.17 Coeficientes EOS Linear Polynomial (Agua).....	54
Tabla 3.18 Restricciones nodales.	56
Tabla 3.19 Velocidades de proyectil para cada caso.....	58

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 100%, energía cinética máxima).	65
Gráfica 4.2 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).	66
Gráfica 4.3 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).	66
Gráfica 4.4 Evolución velocidad proyectiles y detalle mientras atraviesa el tanque (llenado 100%, energía cinética máxima).	67
Gráfica 4.5 Evolución representativa de la velocidad proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).	67
Gráfica 4.6 Presiones cerca de la pared de impacto (llenado 100%, energía cinética máxima). ..	69
Gráfica 4.7 Presiones cerca de la pared de impacto (llenado 75%, energía cinética máxima). ..	69
Gráfica 4.8 Presiones lejos de la pared de impacto (llenado 100%, energía cinética máxima). ..	70
Gráfica 4.9 Presiones lejos de la pared de impacto (llenado 75%, energía cinética máxima). ..	70
Gráfica 4.10 Desplazamiento de la pared de entrada en dirección transversal para todos los materiales, 10ms (llenado 100%, energía cinética máxima).	73
Gráfica 4.11 Desplazamiento de la pared de entrada en dirección transversal para todos los materiales, 10ms (llenado 75%, energía cinética máxima).	73
Gráfica 4.12 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).	74
Gráfica 4.13 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).	75
Gráfica 4.14 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).	75
Gráfica 4.15 Desplazamiento de la pared de salida para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).	76
Gráfica 4.16 Desplazamiento de la pared de salida para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).	77
Gráfica 4.17 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).	78
Gráfica 4.18 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).	79
Gráfica 4.19 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).	79
Gráfica 4.20 Desplazamiento de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).	80
Gráfica 4.21 Evolución de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales (llenado 75%, energía cinética máxima).	81

Gráfica 4.22 Desplazamiento de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).	81
Gráfica 4.23 Desplazamiento de la pared inferior del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).	82
Gráfica 4.24 Energía cinética del agua (llenado 100%, energía cinética máxima).	85
Gráfica 4.25 Energía cinética de las paredes (llenado 100%, energía cinética máxima).	85
Gráfica 4.26 Energía cinética de los proyectiles (llenado 100%, energía cinética máxima).	86
Gráfica 4.27 Energía cinética del agua (llenado 75%, energía cinética máxima).	86
Gráfica 4.28 Energía cinética de las paredes (llenado 75%, energía cinética máxima).	87
Gráfica 4.29 Energía cinética de los proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).	87

I. RESUMEN

En la industria aeronáutica existe una amenaza respecto a los tanques de combustible, esta es el impacto a alta velocidad sobre ellos, debido a que son la superficie con mayor exposición de todos los elementos estructurales susceptibles de impactos por sus dimensiones.

En este trabajo se estudia el comportamiento de un tanque de aluminio con fluido en su interior, tras el impacto a alta velocidad. Analizando mediante la metodología numérica la influencia de la velocidad de impacto y la fracción de llenado.

Para este análisis se usan proyectiles esféricos con las mismas dimensiones, pero de diferentes materiales (acero, titanio, aleación tungsteno y un material rígido con la densidad del plomo) conservando la energía cinética, es decir, la relación velocidad-masa según el material.

Para la simulación numérica de los impactos se ha empleado un programa comercial de elementos finitos, el LS-DYNA, empleando el método ALE para la modelización de los fluidos.

Tras el análisis de los resultados se consigue una mayor compresión del fenómeno de Golpe Hidrodinámico y la influencia que tiene sobre las paredes de los tanques, ayudando así a su reducción o mejoras de diseño.

II. ABSTRACT

There is a threat as far as the fuel tanks is concerned within the aeronautical industry. This threat is impact at high velocity towards them, due to the fact that they are the greatest surface exposed from all the structural elements likely to suffer an impact because of its dimensions.

In this project the behaviour of an aluminium tank with fluid in it after a high velocity impact is under investigation, analysing through numerical methodology the influence of velocity impact and fill level.

For this analysis, spherical projectiles with the same size are being used, but these ones are made off different materials (steel, titanium, tungsten alloy and rigid material with lead density) maintaining the kinetic energy, that is, the relation velocity-mass depending on the material.

For the numerical simulation of the impacts a commercial program of finite elements has been used, the LS-DYNA, using the ALE method for the modelling of the fluids. After the analysis of the results a better understanding of the phenomenon Hydrodynamic Ram is achieved and therefore a better understanding the influence that it has over the walls of the tanks, allowing the reduction of phenomenon and improving the design of the tank.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los fallos estructurales en elementos pueden ser causados por diversos fenómenos, como desprendimientos de material en elementos móviles. Los impactos a diferentes velocidades son un fenómeno que produce daños severos sobre el elemento con el que chocan. Concretamente los impactos a altas velocidades provocan el fallo catastrófico del tanque, por lo que se debe tener en cuenta durante la fase de diseño de los elementos.

Los impactos pueden ser provocados por diversas causas, siendo dificultoso establecer una clasificación en la que se contemplen todas las causas posibles. Pero se pueden citar algunos casos como los impactos balísticos, las explosiones, los impactos de meteoritos o los desprendimientos en movimiento que impactan sobre la aeronave.

En el sector aeronáuticos, los impactos son motivados por los fenómenos meteorológicos como el hielo en altura (Figura 1.1), desprendimientos de elementos de la propia aeronave (Figura 1.2 izquierda) o impactos de aves u otros elementos externos (Figura 1.2 derecha).



Figura 1.1 Golpes de granizo sobre ala de un avión (<http://helicecluster.com>)



Figura 1.2 Impacto de fuselaje en ala y turbinas (Izda.) (<http://www.flickriver.com>). Impacto de ave sobre el ala (Dcha.) (<http://blog.sandglasspatrol.com>)

Los aviones de peso ligero exigen que se integren en las alas los tanques de combustible, esto eleva el riesgo de impacto en él, y por lo tanto el aumento de fallo catastrófico. Si se produce el impacto sobre la misma pérdida de combustible se puede producir una explosión y causar daños sobre otros elementos estructurales cercanos.

Este suceso tiene como explicación que cuando penetra un objeto a alta velocidad sobre el tanque, donde hay alojado un fluido en el interior, se produce una transferencia de energía cinética del proyectil al fluido. Esto implica que se genere una onda de choque que se propaga a través del fluido llegando a las paredes, y finalmente se llega al fallo catastrófico del tanque y los elementos adyacentes. Este fenómeno se denomina Golpe Hidrodinámico o HRAM, en sus siglas en inglés, procedente de Hydrodynamic Ram. Tras este suceso se produce el derramamiento del combustible que debido a su inflamabilidad puede acabar con la explosión produciendo daños severos en todos los componentes de la aeronave.

1.2 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el fenómeno de impacto a alta velocidad sobre tanques de aluminio con fluido en su interior. Para el análisis se emplean modelos numéricos, con los que se estudia el comportamiento del tanque durante el impacto a alta velocidad, siendo los factores analizados: la velocidad de impacto, el material del proyectil y la fracción de llenado.

Otro objetivo es la determinación de la influencia de la velocidad y la energía cinética en el fallo catastrófico del tanque y la cavidad generada por el proyectil durante su avance.

Para conseguir los objetivos propuestos, siguen los siguientes pasos:

- Selección de materiales que no varíen su geometría durante el impacto, debido a sus propiedades.
- Simulación de los distintos casos y configuraciones, mediante el programa de elementos finitos LS-DYNA.
- Analizar y comparar las cavidades creadas durante el impacto, los desplazamientos de las paredes del tanque y la influencia de la velocidad en dos casos de energía cinéticas diferentes.

1.3 CONTENIDO

A continuación, se realiza un breve resumen de la estructuración del proyecto, indicando el número de capítulos de los que consta, 5, y el contenido de ellos.

El primer capítulo, consta de una introducción del tema tratado en el proyecto, los objetivos que se pretenden conseguir a través de él, las partes del ala donde se alojan los depósitos y la explicación del Golpe Hidrodinámico.

En el segundo capítulo, se establecen una introducción de los impactos a alta velocidad sobre tanques, como la mención de estudios anteriores de los que se basa la realización de este proyecto, y explicación de los métodos de formulación existentes con sus correspondientes características.

En el tercero, consiste en el procedimiento seguido durante la modelización de los proyectiles, además de la descripción de los componentes, condiciones de contorno, etc. Y la validación de los modelos numéricos.

En el cuarto, se muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones y se comparan estos resultados entre los diferentes materiales y las velocidades. Las variables que se comparan son los desplazamientos, presiones generadas en los puntos de medición y la transmisión de energía cinética.

Y finalmente, en el último capítulo se encuentran las conclusiones del estudio y las posibles líneas futuras de trabajo.

1.4 SISTEMA DE COMBUSTIBLE

Este capítulo consta de dos apartados: el primero trata de la estructura de los tanques de combustible utilizados en los aviones; y el segundo trata de la estructura del ala donde se alojan los depósitos.

1.4.1 TANQUES DE COMBUSTIBLE DE AVIÓN

Los tanques de combustible son elementos imprescindibles de las aeronaves motorizadas, ya que son los encargados de acumular ese combustible para aportar autonomía a este tipo de vehículos de transporte aéreos. Se pueden distinguir cuatro tipos de depósitos:

- **Depósitos rígidos desmontables**, están situados en compartimentos diseñados con ese propósito. Normalmente están contruidos con materiales metálicos y pueden ser desmontados para revisión o ser cambiados. En su interior hay tabiques separadores o deflectores que están unidos a la estructura del depósito, en ellos se realizan aberturas pequeñas, permitiendo la circulación del fluido a través de ellos. El objetivo de los deflectores es controlar que el combustible no circule libremente. A continuación, en la Figura 1.3 se muestra el deposito con sus partes principales.

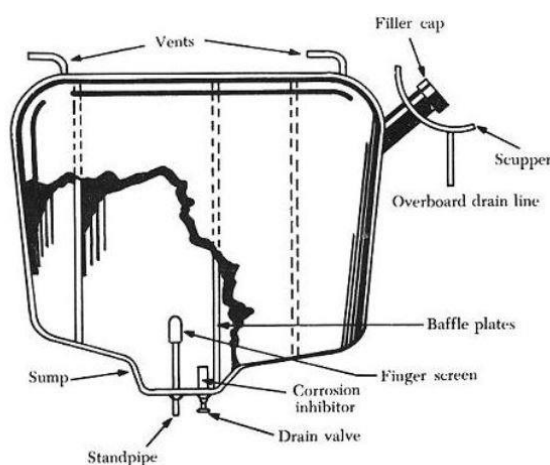


Figura 1.3 Depósito rígido (www.avstop.com)

- **Depósitos exteriores o lanzables**, estos depósitos sirven para aumentar la autonomía de los vuelos que recorren grandes distancias. Se suelen desechar, aunque pueden ser reutilizados en algún caso. A continuación, se muestra en la Figura 1.4 un depósito de este tipo.



Figura 1.4 Una pareja de cazas Saab 39 Gripen con 3 depósitos externos cada uno (es.wikipedia.org).

- **Depósitos elásticos o bladder**, este tipo de depósitos están fabricados con materiales elastómeros, normalmente bolsas de goma reforzada que se sitúan en una sección de la estructura de la aeronave donde se adapta. Estos se fijan mediante botones metálicos o enganches al interior de la cavidad. Se emplean en aeronaves ligeras de altas prestaciones y en aviación comercial. A continuación, en la Figura 1.5 se muestra un ejemplo de este tipo de depósito.

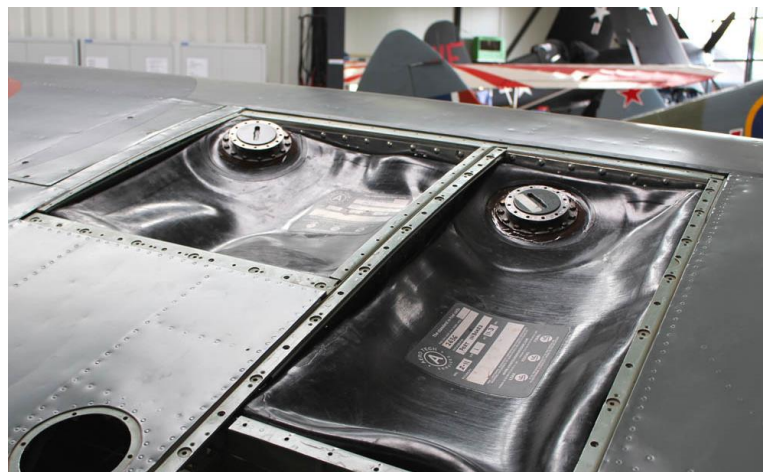


Figura 1.5 Tanque elástico de aeronave (i.stack.imgur.com).

- **Depósitos integrales**, están instalados dentro de la estructura de la aeronave, normalmente son áreas selladas de la estructura para evitar fugas del combustible. Estos tanques aseguran la estanqueidad del combustible una vez fabricados. Frecuentemente estos depósitos se encuentran en las alas (“wet wing”), aunque también se sitúan en la panza y la cola del avión. Se suelen utilizar en aviación militar y pequeñas aeronaves, puesto que se emplean en aviones ligeros. A continuación, en la Figura 1.4 se muestra esos depósitos.

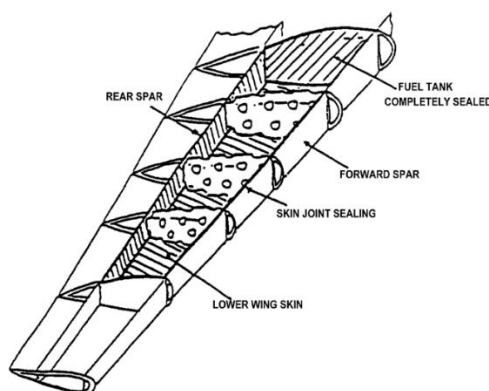


Figura 1.6 Esquema de depósito integrado (<http://1.bp.blogspot.com>).

Este último tipo de depósito, el depósito integrado, es sobre el que se realizan los impactos del estudio, ya que son los más vulnerables a poder sufrir impactos a altas velocidades que conlleven el fallo catastrófico. Este tipo de tanques son utilizados en aviones ligeros que se pretende conseguir mayor autonomía de vuelo como aviones de combate y pequeños vehículos aéreos, aunque también se emplean en aviones comerciales como el A380 y el B747.

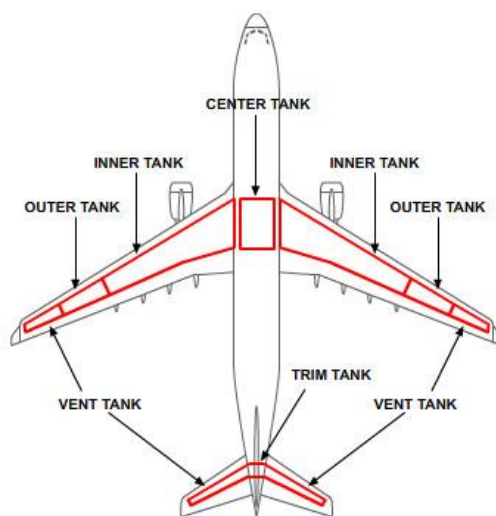


Figura 1.7 Distribución de tanques de combustible (<http://lessonslearned.faa.gov>).

1.4.2 GEOMETRÍA DEL ALA DEL AVIÓN

Se necesita conocer la estructura del ala de un avión para saber cómo se sitúan los depósitos integrales en su interior.

Las alas se encuentran a ambos lados del fuselaje, entre sus funciones se encuentran: ser una superficie sustentadora y soportar cargas. Todo esto hace que las alas varíen en forma, geometría y estructura según el uso del avión. Las partes más características de las alas son:

- **Largueros.** Se trata de un elemento estructural, unas vigas que atraviesan el ala perpendicularmente a la dirección del fuselaje, que aportan resistencia a flexión y a torsión a las alas. Suele tratarse de un solo elemento, con una sección forma rectangular, de “I” o de “T” dependiendo del material empleado, la altura y la resistencia exigida entre otros datos. Hay diferentes tipos de largueros de armadura, si la unión de la platabanda superior e inferior de los largueros se realiza diagonal y/o vertical, y largueros de alma llena, si se unen con una chapa que forma el ala.
- **Costillas.** Son los componentes que dan forma al perfil, también son los encargados de transmitir la carga del revestimiento a los largueros y aumentan la resistencia a torsión. Se encuentran intercalados perpendicularmente a los largueros, manteniendo la separación entre ellos y cerrando las celdas. Además, son los que dan la forma al depósito y deben soportar químicamente el contacto con el fluido. Y según su función se pueden clasificar en:
 - *Costilla de compresión.* Su función es unir los largueros entre sí, transmitiendo y distribuyendo los esfuerzos entre ellos. Se ubican en las zonas donde hay esfuerzos locales, y no tienen por qué colocarse perpendicularmente a los largueros, ya que pueden situarse diagonalmente.
 - *Costillas Maestras.* Aportan rigidez a los elementos y mantienen la distancia entre largueros.
 - *Costillas Comunes.* Su fin es mantener la forma del perfil y transmitir las fuerzas interiores a los largueros.

- *Falsas Costillas*. Se sitúan entre el borde de ataque y los largueros, y su función es mantener la forma del revestimiento.
- **Revestimiento**. es la parte externa que confiere la forma aerodinámica del ala. Además, es el que separa el combustible del interior del medio exterior. Hay dos tipos de revestimiento, el *revestimiento pasivo o no resistente* (tela) y el *activo o resistente* (metálico). Este último tipo aporta resistencia, ya que permite soportar esfuerzos de todo tipo.
- **Herrajes**. Elementos metálicos que unen secciones del ala y resisten vibraciones y esfuerzos.
- **Larguerillos**. Estos elementos son pequeñas vigas que se encuentran en las costillas, y trabajan a tracción o compresión contribuyendo al larguero a soportar los efectos de la flexión.

A continuación, en la Figura 1.8 se muestra la estructura del ala y sus partes nombradas anteriormente.

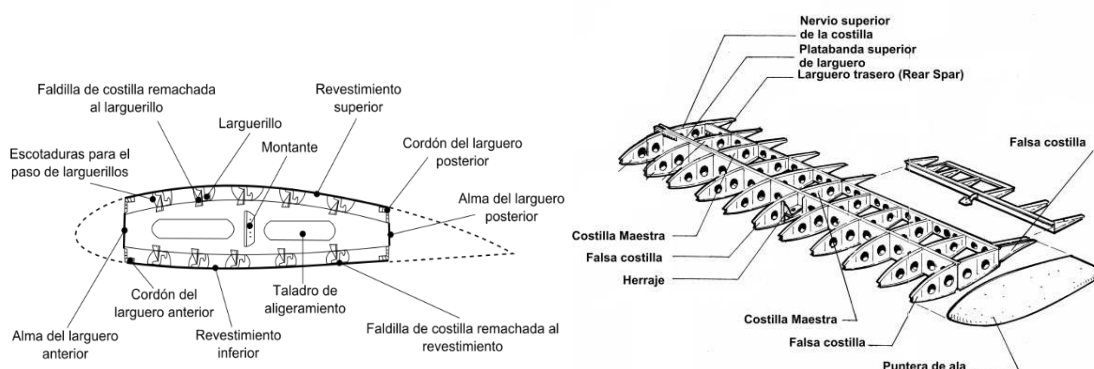


Figura 1.8 Partes del ala de un avión. (es.wikipedia.org)

1.5 IMPACTOS SOBRE TANQUES CON FLUIDO EN EL INTERIOR (GOLPE HIDRODINÁMICO)

Un impacto sobre una estructura es una sollicitación dinámica de gran intensidad durante un periodo breve de tiempo, y que altera la estabilidad de la estructura. Las consecuencias sobre los elementos de la estructura dependen de la velocidad a la que se produce el impacto. Según la velocidad se clasifican en [1]:

- **Impactos a velocidades bajas ($< 50 \text{ m/s}$):** Efectos elásticos, o deformaciones plásticas localizadas.
- **Impactos a velocidades media ($50 \text{ m/s} < v < 500 \text{ m/s}$):** Deformaciones plásticas son generalizadas.
- **Impactos a velocidades altas ($500 \text{ m/s} < v < 2000 \text{ m/s}$):** La resistencia viscosa del material no presenta importancia.
- **Impactos a hipervelocidades ($> 2000 \text{ m/s}$):** El material se puede considerar como un fluido hidrodinámico.

Debido a diseños que exigen aeronaves de muy bajo peso, se decide alojar el combustible en el interior de las alas. Puesto que es un problema complejo de solucionar con refuerzos, debido a que estos aumentarían el peso de la aeronave, y que las alas son un área de gran dimensión vulnerable a sufrir impactos.

Cuando se produce el impacto en tanques llenos de fluido, el proyectil pierde energía velocidad a medida que avanza debido a las fuerzas de resistencias ejercidas por el líquido. Además, parte de la energía cinética del proyectil se emplea en desplazar el fluido generando una sobrepresión en él. Las presiones se transmiten a las paredes del tanque, lo que acaba provocando desplazamientos y finalmente daño estructural. Un efecto adicional es el aumento del orificio de entrada lo que conlleva la pérdida de gran parte del combustible, con el consiguiente riesgo de incendio y explosión.

Este fenómeno se denomina Golpe Hidrodinámico (Hydrodynamic Ram, HRAM), y su evolución se puede estudiar en cuatro fases [2, 3].

- **Fase de choque.** En esta fase comienza cuando el proyectil perfora la pared del tanque e impacta sobre el fluido. En ese momento, el proyectil comienza a transferir la energía cinética al fluido, lo que provoca una aceleración en él y genera una onda de choque hemisférica centrada en el punto de impacto. Esta onda es de elevada presión lo que puede llegar a producir fisuras por los estados tensionales localizados cerca del orificio.

La intensidad del campo de presiones generado varía según la cantidad de energía transmitida al fluido en el momento inicial del impacto, es decir,

dependerá de la forma, masa y la energía cinética inicial del proyectil. Aunque el valor máximo de la presión es alto disminuye rápidamente.



Figura 1.9 Fase de choque. (<http://www.sciencedirect.com>).

- **Fase resistente.** Durante esta fase el proyectil va perdiendo velocidad, según va atravesando el fluido, esto se debe a las fuerzas de resistencia viscosa del combustible. La energía cinética perdida por el proyectil se utiliza para desplazarlo de su trayectoria, generando así un campo de presiones que se transmite a las paredes finalmente. A diferencia de la fase de choque, el fluido se acelera de forma gradual, lo que genera un pulso de menor valor que en la fase de choque, pero de una duración mayor. El movimiento del fluido y la presión suele continuar incluso tras abandonar el proyectil el tanque.

Esta fase transcurre mientras el proyectil avanza en el tanque y llega a generar grandes daños estructurales.

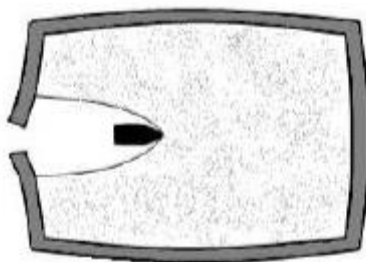


Figura 1.10 Fase resistente. (<http://www.sciencedirect.com>).

- **Fase de cavitación.** Esta fase ocurre simultáneamente a la fase resistente, mientras el proyectil atraviesa el tanque. Durante esta fase el proyectil comunica una velocidad radial al fluido de forma que se genera una cavidad detrás del proyectil. Esta cavidad se expande a lo largo de la trayectoria tomando una forma parecida a una esfera, y finalmente colapsa disminuyendo el tamaño, esta expansión y colapso puede repetirse durante varios ciclos hasta que desaparece

por completo. Durante cada ciclo de expansión y colapso se producen pulsos de presión significativos

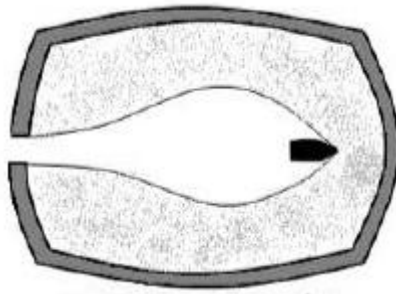


Figura 1.11 Fase de cavitación. (<http://www.sciencedirect.com>).

- **Fase de salida.** Esta fase comienza cuando el proyectil llega al final del tanque y perfora la pared de salida. La fase de salida difiere de la de choque en que la perforación es en una pared esta pretensionada, esa precarga es generada por el fluido que el proyectil había acelerado y desplazado a esa pared. La precarga junto al impacto del proyectil puede provocar la aparición de fisuras radiales en la pared de salida.

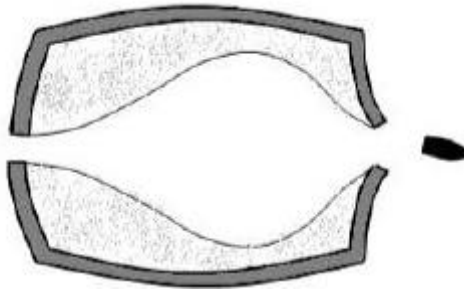


Figura 1.12 Fase de salida. (<http://www.sciencedirect.com>).

Estas fases ocurren en un intervalo muy pequeño de tiempo, en apenas unos milisegundos tienen lugar todas las fases. Por esto es difícil tomar mediciones en las fases experimentales y se deben complementar y apoyar con los datos numéricos obtenidos en simulaciones, debido a que los mecanismos utilizados para disminuir los impactos son muy costosos. Así con las técnicas computacionales se estudia el comportamiento y el rendimiento ahorrando costes de pruebas que no aportarían soluciones.

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran algunos estudios experimentales y analíticos que se han llevado a cabo anteriormente. También una introducción al método de elementos finitos, al programa LS-DYNA y a la formulación que se utiliza en este trabajo..

2.2 ESTUDIOS REALIZADOS

A continuación, en los siguientes apartados se incluirán estudios realizados por otros autores a lo largo del tiempo, sobre el fenómeno que se estudia.

2.2.1 ESTUDIOS EXPERIMENTALES

El fenómeno del Golpe Hidrodinámico, y los efectos que conlleva, se comenzó a estudiar a partir de la década de los 70. Los primeros que investigaron esto, fue el Departamento de Defensa de EE. UU., principalmente por el grupo situado en California Naval Weapons Center (NWC), su investigación consistía en varios ensayos con diferentes tipos de proyectiles que impactaban sobre un recipiente cubico de 1.5 m de lado abierto por la parte superior, y con la parte posterior reforzada para que el proyectil no atravesara dicha pared. El objetivo de este ensayo era la medición de la presión en diferentes puntos del fluido interior y como variaba en función del tipo de proyectil. Los resultados que se obtuvieron determinaban que el giro del proyectil dentro del fluido aumentaba hasta en cinco veces la presión la presión respecto a proyectiles que no giraban, y que la distancia que comenzaba el giro no dependía del espesor ni del material de la placa de impacto. Este ensayo, así como sus resultados se encuentran en el trabajo realizado por Lundstrom y Stull [4].

El Naval Postgraduate School (NPS), situado en Monterey (California), con la intención de completar el trabajo anterior, se centraron en la medición de las presiones del fluido y las deformaciones de la pared de entrada. Para ello se emplearon tanques cúbicos de las mismas dimensiones abiertos por la parte superior, pero con mayor rigidez estructural con paneles posterior y anterior recambiables, aparte de diferentes tipos de proyectiles disparados con diferentes energías cinéticas. Los resultados pueden verse en las referencias [5]- [6]. Estos ensayos permitieron analizar las fisuras de la pared de salida [7], además la fase analítica se centró en conseguir la predicción de la respuesta de las paredes tanque a las presiones generadas.

El Instituto de Investigación de la Universidad de Dayton también participó en la investigación del Golpe Hidrodinámico, realizando varios ensayos de impacto sobre depósitos de combustible. Estos depósitos eran réplicas del tanque del avión de combate A-10 (95x102x114 mm). Para sus ensayos emplearon proyectiles esféricos de diámetros de 11.1 y 14.3 mm, disparados a unas velocidades comprendidas entre los 1.5 y los 2.4 Km/s. el tanque como en los estudios anteriores se encontraba abierto por la parte superior, y el fluido del que estaba lleno era agua. Además, las placas empleadas eran de un espesor de 1.6 mm, y los materiales que se utilizaron eran aluminio: 2024-T3 y 7075-T6, aparte de que algunos paneles se respaldaron con espuma balística. Los datos que se obtuvieron del ensayo fueron los desplazamientos de las paredes laterales y de entrada, presiones del fluido, y la trayectoria recorrida por el proyectil, y con ellos se llegó a la conclusión que los daños producidos por el Golpe Hidrodinámico en el aluminio 2024-T3 era menor que en el 7075-T6, además se observó que los paneles recubiertos con espuma balística a mismas características de proyectil e impacto sufrían menos daños la pared de entrada [8].

Otro trabajo que realizó Bless para completar el anterior, consistió en el estudio de los fallos, los desplazamientos y las presiones que se alcanzaban en los depósitos hexaédricos de aluminio y carbono epoxi abiertos por la parte superior, en los que impactaban proyectiles esféricos y cúbicos. También a algunos paneles se les añadió un recubrimiento de espuma balística y rigidizadores. Los resultados observados fueron el fallo catastrófico tras el impacto y la velocidad umbral a la que se producía el fallo de la estructura, ya que a velocidades menores a esta solo se generaba un orificio de impacto, no como a superiores que comenzaba la aparición de fisuras a lo largo del panel aparte se observó que los rigidizadores al limitar el desplazamiento del panel también limitaban las fisuras generadas. Con lo que se llegó a la conclusión que la espuma balística y los rigidizadores reducían el impacto de las ondas de presión sobre las paredes y con ello riesgo de fallo catastrófico. Además, Bless determinó que la condición de fallo podía relacionarse con la siguiente expresión $V^2d/W=constante$, donde V es la velocidad, d el diámetro del proyectil y W el espesor del panel. Esto se encuentra detallado en la referencia [9].

A comienzos de los 80, en 1983, Copland [10] llevo a cabo un estudio sobre la capacidad de atenuación del Golpe Hidrodinámico en vehículos blindados de distintos agentes

inertes. Para este ensayo se emplearon tanques cilíndricos y metálicos de 20 y 200 l de capacidad, proyectiles AP (Armour Piercing) del calibre 12.7 mm y esferas de acero de 11.9 mm de diámetro, disparados a altas velocidades, en torno a los 1000 m/s. Los tanques contenían en su interior agua, y como en los anteriores estudios citados algunos casos se empleaban como materiales de protección como espuma balística y *Explosafe*, utilizado en este caso. Este consiste en láminas de aluminio que forman una red hexagonal. Las conclusiones obtenidas en este ensayo fueron que la espuma balística si atenuaba el fenómeno mientras que el *Explosafe* podía llegar hasta ser perjudicial, Copland observó que los depósitos de 20 l a los que se le impactaba los proyectiles AP sufrían mayores daños por el Golpe Hidrodinámico, debido a que comenzaban a girar e interactuar con el fluido, al desviar su trayectoria, además si se le añadía el *Explosafe* se agravaba el fenómeno. También Sparks empleó el mismo tipo de proyectil en su estudio con el fin de analizar las trayectorias y presiones en el fluido [11].

En 1988 un grupo de I+D perteneciente a la OTAN llamado AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development) [12], llevó a cabo una sucesión de ensayos de impactos a muy alta velocidad en depósitos de aluminio y carbono-epoxi, con proyectiles esféricos y cúbicos con una masa de 129 g. El objetivo consistía en determinar la influencia de la forma del proyectil, el ángulo de impacto y el tipo de unión de los paneles rigidizadores. Las conclusiones obtenidas fueron que la forma del proyectil influye en gran medida en la respuesta de la estructura del tanque tras el impacto y el fenómeno del Golpe Hidrodinámico, también se observó que los daños más severos producidos en el panel de salida se encontraban en las uniones y en la zona cercana al impacto, y que en el panel de entrada la única parte dañada era la zona próxima al impacto.

Al año siguiente, en 1989, Lundstrom y Anderson [13] realizaron unos ensayos con explosivos incendiarios (HEI) que impactan sobre tanques hexaédricos con paredes laterales reforzadas, 6.3 mm de espesor, respecto a las paredes de entrada y salida de 3.2 mm, además el tanque estaba abierto por la parte superior. Este nuevo proyectil con el que se realizaban los ensayos era lanzado y explosionaba una vez que penetraba en el fluido, además eran de tamaños diversos. El objetivo de este experimento eran conocer las presiones del fluido mediante los transductores colocados en el interior cuando se producía la explosión del proyectil (HEI).

En 2004 se publicó el trabajo de Seddon et al. [14], que trataba de estudiar las causas del accidente del Concorde que sucedió en el año 2000, mientras el avión despegaba. El ensayo consistió en hacer impactar proyectiles de Nylon de 2.5 kg sobre un tanque de acero ($2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$) con diferentes volúmenes de llenado a velocidades que oscilaban entre los 14 y 21 m/s, y las paredes estaban fijadas mediante pernos para poder probar diferentes materiales y espesores de estas. El objetivo de este trabajo era estudiar la respuesta del tanque frente al Golpe Hidrodinámico, para ello se midió la presión del fluido, las aceleraciones de las paredes frontal y trasera, y las deformaciones en el punto de impacto, para luego compararlo con los datos obtenidos en las simulaciones realizadas con el código de elementos finitos, LS-DYNA. Siendo los datos obtenidos por los dos métodos similares, aunque se concluyó que se debían llevar a cabo más trabajos experimentales y de simulación numérica para la comprensión de la interacción fluido-estructura.

Otro trabajo de metodología similar fue el de Poehlmann-Martins et al. [15] que consistía en un contenedor cilíndrico de aluminio con los extremos de poliéster (Mylar) lleno de fluido que era atravesado por una esfera de acero con. Debido a la rigidez del contenedor no se pudo analizar la interacción fluido-estructura, así que se analizó la evolución temporal de la presión en diferentes puntos del fluido.

En el año 2006, Nishida y Tanaka [16] llevaron a cabo un ensayo en el impactaban proyectiles esféricos de diversos diámetros a unas velocidades que oscilan entre los 40 y los 200 m/s sobre tubos de aluminio de 50 mm de diámetro, de un espesor de 1 mm y de 250 mm de longitud. El objetivo era analizar la influencia de la dimensión y la velocidad a la que impactaba el proyectil sobre el tanque. Los datos analizados fueron la presión interior del fluido, las deformaciones de la pared de entrada y salida en las zonas próximas al impacto, con estos datos se determinó que en función del diámetro del proyectil el límite de velocidad al que se producen fisuras y el límite de velocidad al que aparece el agrietamiento.

En 2009, fue realizado un trabajo en la Universidad Carlos III de Madrid por David Varas et al. [3], el ensayo consistía en estudiar el fenómeno del Golpe Hidrodinámico experimentalmente y validar un modelo numérico mediante el código LS-DYNA. Para eso se emplearon tubos cuadrados de aluminio Al6063T-5 de 750 mm de longitud, de un ancho de 150 mm y un espesor de 2.5 mm, y con extremos sellados con

polimetilmetacrilato (PMMA) de 30 mm de espesor. Además, se hacen ensayos con diferentes porcentajes de llenado del depósito (100%, 70% y 60%). Los proyectiles utilizados fueron esferas de acero templado de 8 g y un diámetro de 12.5 mm, que son lanzados a 600 y 900 m/s. Los datos que se midieron fueron la presión en el fluido y la deformación de las paredes mediante bandas extensiométricas, y los desplazamientos que sufrieron también las paredes durante el impacto, además se hizo una filmación de la trayectoria del proyectil con cámaras de alta velocidad. Con esos datos se concluyó que la onda de presión que se origina en la fase de choque depende de la velocidad de impacto, y su duración depende del porcentaje llenado del tubo, también se determinó que la fracción de llenado a una determinada velocidad tiene influencia en el pulso de presión es más significativa en las zonas próximas al impacto. Además, que el momento normal transmitidos del fluido a las paredes tiene influencia en las deformaciones, siendo superior a velocidades de impactos altas. Otra apreciación del ensayo consiste que cuando el tubo está parcialmente lleno la deformación de las paredes se encuentra muy localizada. Y, por último, el porcentaje de llenado influye en la deformación permanente en las zonas lejanas mientras la velocidad tiene influencia en las zonas cercanas.

2.2.2 ESTUDIOS NUMÉRICOS

Para comprender mejor el fenómeno del Golpe Hidrodinámico se lleva tratando de modelizar desde hace unos 40 años, con mayor o menor precisión. Al principio se intentó solucionar, simplificando a una estructura sometida a un campo de presión que simulaba la acción del fluido interior sobre las paredes del depósito. Tras esto se optó por representar la estructura por un lado y las líneas de fluido por otro para después juntarlas. En la actualidad se trata de forma conjunta, donde el grupo de ecuaciones no lineales se solucionan mediante técnicas numéricas que tienen en cuenta simultáneamente todos los elementos del sistema (estructura, fluido y proyectil) y sus interacciones. Ahora se expondrán algunos trabajos anteriores sobre el modelo numérico.

Los primeros modelos utilizaban la *Teoría del Pistón*, que consistía en una simplificación en la interacción fluido-estructura. En este método se tiene en cuenta la reflexión normal de las ondas de presión cuando chocan con la estructura, la presión que actúa sobre la pared se divide en presión incidente que es constante y presión reflejada.

Esta teoría fue incorporada por Ball en dos códigos de análisis estructural, *BR-1* [17] y *SATANS (Static And Transient Analysis, Nonlinear, Shells)* [18] para la simulación del Golpe Hidrodinámico. El código BR-1 era completo, se podían definir materiales ortótropos y que existiese la posibilidad de que se produjeran deformaciones plásticas, pero el inconveniente era que se debía definir la presión incidente para que el código tuviera solución. El código SATANS poseía gran eficiencia, pero era necesario que la geometría fuera axilsimétrica y con materiales isótropos para que pudiera converger. Después de realizar estos estudios se rechazó la *Teoría del Pistón* debido a que los códigos calculaban erróneamente la presión generada por el Golpe Hidrodinámico, además las deformaciones y desplazamientos obtenidos diferían de los resultados experimentales.

Tras descartar la teoría anterior, Lundstrom propuso el *Método de la Imagen Variable* (Variable Image Method) [19]. Este método quedó descartado al comprobarse que solo era válido para modelos 2D, aunque resolvió algunos casos unidimensionales como la *Teoría del Pistón*.

Ankeney [20] también buscó una alternativa a la *Teoría del Pistón*, para ello desarrollo un modelo estructural, observando y observó su comportamiento frente al Golpe Hidrodinámico.

Con la unión de las dos nuevas propuestas, el modelo de Lundstrom que describía la interacción fluido-estructura y la de Ankeney que describía la respuesta estructural, surgió el programa *Unimodal Hydraulic Ram Structural Response* (UHRSR). Wada, Heitz y Jacobson añadieron al código UHRSR la capacidad de resolver modelos ortotrópicos [21], pero al comparar con los resultados experimentales se observó que no conducían a la misma solución.

Herlin y Avery juntaron los códigos UHRSR y el BR-1FC, una extensión del BR-1, creando un nuevo código *Hydraulic Ram Structural Response* (HRSR) [22]. Mas tarde Rosenberg et al. [23] introdujeron innovaciones en el código HRSR y el UHRSR, como la opción de la cavitación durante el análisis, y así finalmente surgió el código ERAM.

A pesar de todos estas innovaciones y desarrollos los códigos para el método numérico no llegan a ser lo precisos con las interacciones fluido- estructura que se requerían y no permitían trabajar con geometrías complejas. Por otro lado, Rosenberg y Bless,

mediante los principios en de la Mecánica de Fractura y datos empíricos, demostraron que la velocidad a la que falla la pared es dependiente de la geometría del tanque y del proyectil, a parte de la tenacidad del material. También Bradley y Avery [24] hicieron un estudio con los principios de la Mecánica de Fractura. Otros que también emplearon la Mecánica de fractura fueron Ball y Fahrenkrog, la utilizaron para el cálculo de las longitudes de las grietas de las paredes dañadas, pero al usar la *Teoría del Pistón* por lo que no se tuvieron en cuenta las tensiones debido a su forma de definir la interacción fluido-estructura.

Otros autores como Wierzbicki y Mousse [25] hicieron estudios del Golpe Hidrodinámico, pero solo considerando el régimen elástico, y así estudiaron la respuesta elastoplástica de la estructura del depósito.

Otro estudio fue el realizado por Kimsey [26], que consistía en el impacto de un cilindro de acero sobre un depósito de forma geométrica. En este estudio se utilizó el código EPIC-2, era un método de elementos finitos Lagrangiano. Aunque se utilizó esa técnica y los elementos sufrían distorsiones los resultados resultaron óptimos.

A partir del año 1990 un gran avance con la aparición del Método Lagrangiano Euleriano Arbitrario, llamado también ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), en él se combinan las formulaciones Lagrangianas y Eulerianas. También apareció otra técnica llamada Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) que era usada para simulaciones en las que intervenían fluidos, donde las deformaciones de las estructuras eran muy grandes. Estos dos códigos serán detallados más adelante.

2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

En los siguientes puntos se explica de que trata el Método de Elementos Finitos, el código utilizado en el trabajo y la formulación que se emplea.

2.3.1 INTRODUCCIÓN

Se les considera los precursores de este método de cálculo a Turner, Clough, Topp y Martin en 1956, aunque con el tiempo el número de autores que intervinieron fue aumentando. Con la aparición del Método de Elementos Finitos (FEM) se consiguió la resolución de problemas complejos de forma aproximada, debido a las suposiciones del

método, estos problemas eran casi irresolubles con los análisis matemáticos anteriores. Pero para llegar hasta este punto y resolverlos mediante el método FEM, hubo que validarlo, para ello se realizaron numerosos prototipos y ensayos, lo que incrementaba el tiempo invertido, y por consiguiente los costes económicos.

El método consiste en la división de un sistema continuo de infinitos grados de libertad, en un conjunto de elementos finitos unidos entre sí a través de puntos llamados nodos, llegando así a un sistema discreto, es decir, con un número de grados de libertad finito, a esta transformación se le denomina discretización. El comportamiento del sistema continuo está regido por una o por un conjunto de ecuaciones diferenciales, mientras que si es un sistema discreto es gobernado por ecuaciones lineales o no lineales.

Pasos que seguir en la discretización:

- Cada elemento tendrá una propiedades y cargas externas constantes.
- Definir los nodos en puntos donde se apliquen fuerzas puntuales.
- En las zonas de singularidades geométricas, apoyos o fuerzas localizadas se debe disminuir el tamaño de los elementos.

Cuando se analiza cualquier sistema se distinguen los siguientes términos: *Dominio*, espacio geométrico a estudiar del sistema; *Condiciones de contorno*, variables que condicionan la evolución del sistema (desplazamientos, cargas, temperaturas...); e *Incógnitas*, variables que se pretende conocer.

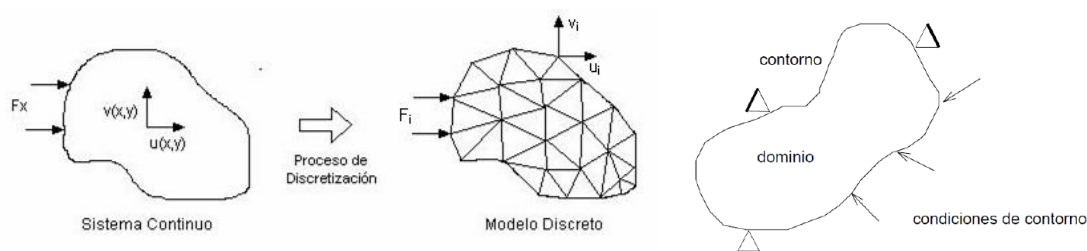


Figura 2.1 Discretización (Izqda.) y Partes de un sistema (Dcha.) (<http://finitosxtecnologia.blogspot.com.es/>).

Cuando se procede a la resolución del problema el dominio se divide en elementos, en los casos unidimensionales se divide en puntos, en los bidimensionales en líneas y en los tridimensionales en superficies, y estos elementos se unen entre sí mediante nodos. Después a cada nodo se le asocian unas incógnitas denominadas grados de libertad,

todos estos nodos unidos por los elementos finitos formaran una malla. La resolución se resume en los siguientes pasos:

- Definición de la geometría que se estudia.
- Especificación del régimen del modelo.
- Definir propiedades del material.
- Establecer las condiciones de contorno y las cargas aplicadas.
- Mallar el modelo.
- Solucionar el problema y analizar los resultados obtenidos.

Este método está desarrollado para el campo de desplazamientos del sólido, y así establecer deformaciones y tensiones mediante las relaciones cinemáticas y constitutivas. También se pueden calcular las fuerzas sabiendo los desplazamientos y viceversa, ya que están relacionados a través de la *Matriz de Rigidez* del sistema. El número de ecuaciones obtenidas es proporcional al número de nodos.

Una propiedad importante es la convergencia, que significa que la solución numérica obtenida se acerca a la solución exacta, y esto se consigue más rápido realizando particiones más “finas”. Esto se puede comprobar mediante el análisis de sensibilidad de la malla, permitiendo ver si se puede obtener una solución que converja hacia a la exacta.

2.3.2 ANÁLISIS EN SÓLIDOS ELÁSTICOS MEDIANTE EL FEM

Una vez discretizado el sistema continuo, este ha quedado dividido en elementos finitos con un nodo en cada extremo del elemento, además cada nodo y cada elemento tendrá una numeración global y local.

Una vez establecidas las posiciones globales de los nodos ($\{x^e\}$) y las funciones de mapeo ($[M]$) se pueden conocer todos los puntos interiores del elemento. Ver expresión (2.1).

$$\{x\} = [M] \{x^e\} \quad (2.1)$$

Donde $\{x\}$ es el vector de posición y $\{x^e\}$ es el vector de posición de los nodos, y poseen coordenadas x, y, z. $[M]$ que es la función de mapeo se calcula poniendo cero en todos los nodos excepto en el mismo que tomará el valor unidad.

Esto se hace de la misma forma para el modelo de los desplazamientos, es decir, los desplazamientos interiores, se pueden escribir en función de los desplazamientos nodales ($\{d^e\}$) y de la matriz con las funciones de forma ($[N]$), ver ecuación (2.2).

$$\{d\} = [N] \{d^e\} \quad (2.2)$$

Donde la matriz de forma es igual de la de mapeo siempre que las formulaciones sean isoparamétricas.

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

Conociendo los desplazamientos se pueden hallar las deformaciones en cada elemento, partiendo de que se obtienen con la derivada de los desplazamientos. Los desplazamientos nodales son constantes, por lo que las derivadas son aplicadas en las funciones de forma, quedando la expresión de la ecuación (2.3).

$$\{\varepsilon\} = [\partial] \{d\} \quad (2.3)$$

Donde la matriz $[\partial]$ es la siguiente,

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Para la obtención de la matriz $[B]$, se aplica el operador ∂ a la matriz con las funciones de forma. La nueva forma de la matriz de deformaciones se muestra en la ecuación (2.4)

$$\{\varepsilon\} = [\partial] \{d\} = [\partial] [N] \{d^e\} = [B] \{d^e\} \quad (2.4)$$

Siendo la matriz [B]:

$$[B] = [\partial] [N] = [\partial] \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} = [B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_n]$$

Cada matriz B_i se calcula de la siguiente forma,

$$B_i = [\partial] \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Ahora se procede al cálculo de las tensiones mediante el vector de las deformaciones ($\{\epsilon\}$) y la matriz elástica ([D]), quedando la ecuación (2.5).

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2.5)$$

La matriz de rigidez del elemento se puede calcular con la matriz [B] y [D], ver ecuación (2.6).

$$K^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (2.6)$$

Ensamblando la matriz de rigidez de cada elemento se obtiene la matriz de rigidez global ([K]), con ella y los desplazamientos de los nodos podemos calcular el vector de cargas externas de los nodos. Y con ello, ya se podría calcular para cualquier punto del sistema, ver ecuación (2.7)

$$\{F\} = [K]\{d^e\} \quad (2.7)$$

2.3.3 RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS NO LINEALES MEDIANTE EL FEM

Existen casos en los que la matriz de rigidez o el vector cargas pueden ser dependientes del tiempo, es decir, son problemas no lineales. Esto significa que las deformaciones y las tensiones calculadas también dependen del tiempo.

Existen los siguientes tipos de no linealidad:

- **No linealidad geométrica.** Se produce cuando la geometría del sólido varía con la aplicación de cargas y los desplazamientos no son despreciables, además las deformaciones no pueden asemejarse a un modelo lineal
- **No linealidad material.** Cuando las relaciones tensiones-deformaciones del material no son lineales, debido a las propiedades del sólido (plásticos, viscoplásticos).
- **No linealidad de las condiciones de contorno.** Cuando las condiciones de contorno tienen como variable el tiempo.

Cuando se trata de un problema no lineal la solución no se consigue directamente como en los problemas lineales, sino hay que solucionarlo de forma incremental. Así queda la nueva ecuación de cargas $\{F\}$, ecuación (2.8)

$$\{F\} = K(d^e)d^e \quad (2.8)$$

El término $\{F\}$ de la ecuación serán las cargas externas ($\{F_e\}$), mientras que el término $(K(d^e)d^e)$ son las fuerzas internas ($\{F_i\}$), además la matriz de rigidez global es una función del vector de desplazamientos nodales, que son incógnitas.

Deben poseer el mismo valor las fuerzas internas y externas se genera un vector residual, por tanto, se definirá un vector residual ψ igual a cero, ya que el sistema debe estar en equilibrio entre esas fuerzas. Y se define en la ecuación (2.9).

$$\psi(d^e) = F_i(d^e) - F_e = 0 \quad (2.9)$$

Una forma de resolver las ecuaciones no lineales es el Método Newton-Raphson [27], que enuncia que si se conoce una solución aproximada se puede conseguir una solución más aproximada, como se muestra en la ecuación (2.10).

$$(d^e) = (d^e)^{n+1} = (d^e)^n + \Delta(d^e)^n \quad (2.10)$$

Ahora el vector residual se aproxima mediante una función definida mediante una serie de Taylor. A continuación, se muestra la representación gráfica en la Figura 2.2.

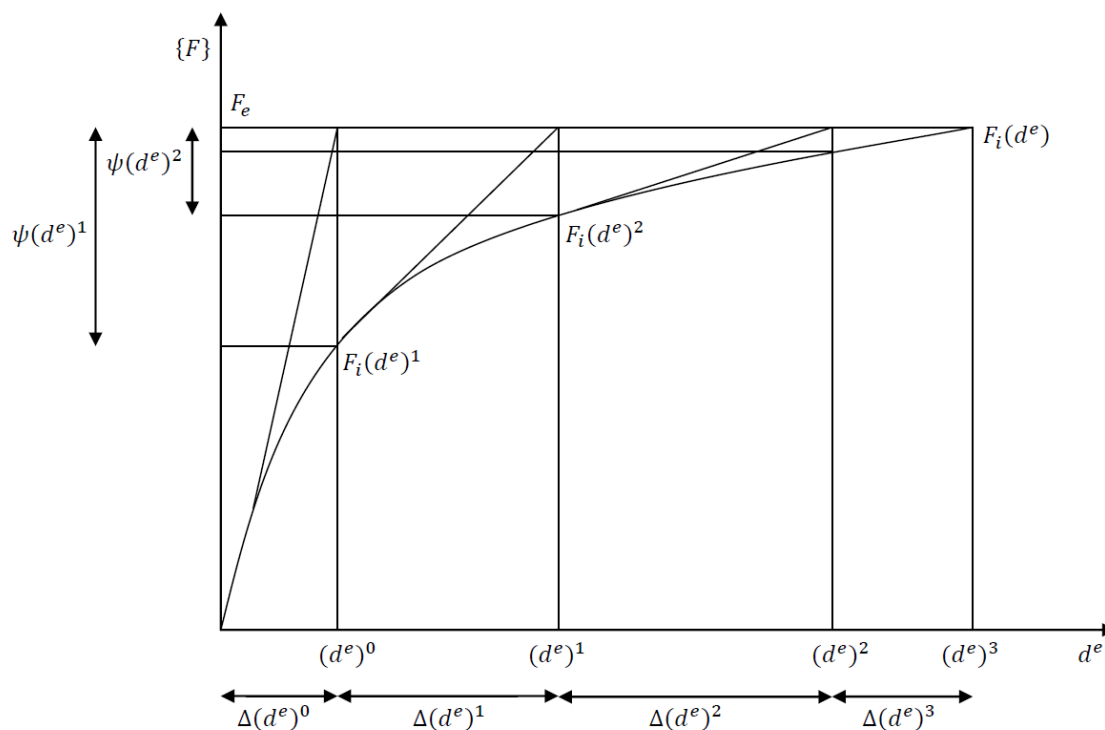


Figura 2.2 Método de Newton-Raphson (<http://es.scribd.com>).

2.3.4 LS-DYNA

En este apartado se explicará el programa que se utiliza y el código de elementos finitos empleado y sus características.

2.3.4.1 HISTORIA

LS-DYNA surgió del programa DYNA3D desarrollado por Hallquist [28] en el *Lawrence Livermore National Laboratory* en 1976. Fue creado para simular el impacto de una bomba nuclear, pero al final la bomba fue cancelada, y se siguió desarrollando este código. Al principio se utilizó para el análisis de tensiones en estructuras sometidas a variedad de impactos. También hay que destacar que a la vez que se desarrollaba el código en 3D, el DYNA3D, se desarrollaba un modelo en 2D, el DYNA2D.

En 1979 fue cuando se produjo el lanzamiento al mercado la nueva versión del DYNA3D, esta era una versión optimizada en cuanto a velocidad de sacar los resultados y con los problemas de interfaz eliminados.

Tres años más tarde, en 1982, se lanzó otra actualización en la que se añadían nueve materiales más y se comenzó a trabajar en casos con la estructura de los explosivos y las interacciones suelo-estructura.

Y se siguió haciendo mejoras en el programa, hasta que en 1987 John O. Hallquist fundó Livermore Software Technology Corporation (LSTC) para continuar el desarrollo del DYNA3D que en la versión comercial recibió el nombre de LS-DYNA. Y se sigue desarrollando el programa actualmente

2.3.4.2 CARACTERÍSTICAS

LS-DYNA es un código de elementos finitos tridimensionales que se emplea para el análisis de las deformaciones y el comportamiento dinámico de la estructura. Este código también permite abordar problemas en los que hay contactos entre los fluidos y la estructura, y análisis estructurales y transferencia de calor. Para los cálculos se utiliza una metodología basada en la integración temporal explícita.

Las capacidades más destacadas del código son: la capacidad de que las superficies rígidamente unidas sean malladas de forma variable sin tener que mallar regiones de transición; el empleo de cordones en aplicaciones metálicas de forma sencilla, solo definiendo una línea de nodos en el cordón; los algoritmos contacto-impacto que transforman contactos complejos en sencillos; posibilidad de análisis de fallos y propagación de grietas, análisis de SPH, dinámica de cuerpos rígidos, etc.

Además, el programa posee una base de datos de materiales, modelos constitutivos, ecuaciones de estado y algoritmos de contactos. Y para la fase de discretización del sistema se emplean elementos tipo amortiguadores, resorte, vigas, placas, elementos gruesos, etc.

Otras características del código es que los archivos de entrada están en formato ASCII por lo que se pueden preparar o modificar con cualquier editor de texto, el archivo ejecutable se ejecuta en una consola de comandos, las geometrías pueden ser diseñadas con programas gráficos y luego ser exportados al preprocesador de LS-DYNA.

2.3.5 TIPOS DE FORMULACIONES EXISTENTES

Hay diferentes tipos de formulación de elementos según las características del mallado que precise el modelo. A continuación, explicaremos algunas de ellas, pero en concreto

la utilizada para la resolución de los modelos del trabajo, el método Lagrangiano Euleriano Arbitrario.

2.3.5.1 FORMULACIÓN LAGRANGIANA

Este método se emplea para elementos de estructuras rígidas, cada punto material es un punto de la malla, es decir, el material se deforma o gira la malla también lo hace simultáneamente (Ver Figura 2.3). Y como el material no sobrepasa el contorno del elemento por lo que el elemento Lagrangiano conserva la masa.

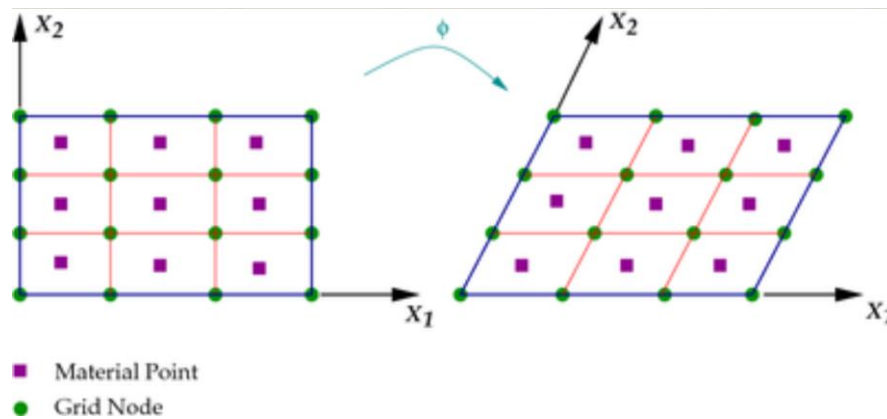


Figura 2.3 Método Lagrangiano (<https://prezi.com>).

Este método funciona para desplazamientos y deformaciones ínfimas, por eso suele emplearse para análisis de mecánica estructural.

La formulación Lagrangiana implica que la malla computacional tendrá la misma trayectoria que el sistema continuo, de tal forma que los puntos del material permanecen unidos a los nodos del mallado durante la respuesta estructural. En mecánica de medios continuos se definen dos dominios el del material (R_m), definido por coordenadas materiales, m , y el de las coordenadas espaciales, e , el dominio espacial (R_e). Para definir el movimiento de los puntos materiales se establece una relación entre las dos coordenadas m y e con una función φ , con las leyes de movimiento en dependientes del tiempo. Paso de una configuración a otra ver Figura 2.4.

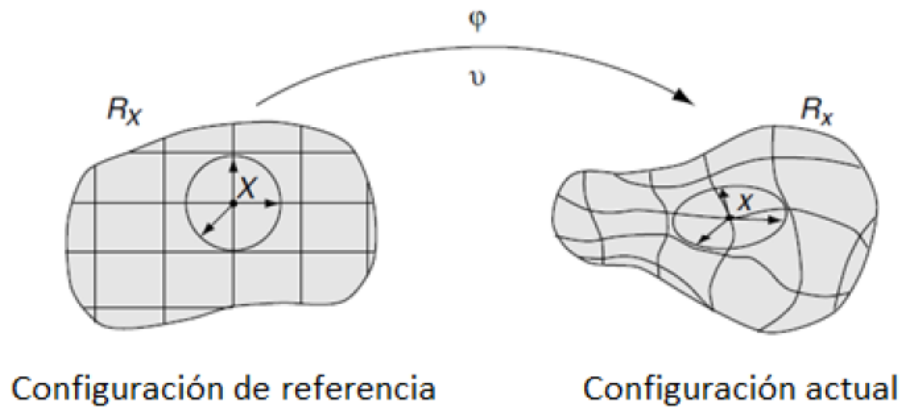


Figura 2.4 Cinemática Lagrangiana [29].

$$\varphi: R_m \times [t_0, t_{final}] \rightarrow R_e \times [t_0, t_{final}]$$

$$(m, t) \rightarrow \varphi(m, t) = (e, t)$$

Con la función φ se puede identificar el historial de movimiento. Y con la función inversa, φ^{-1} , se puede conocer la posición material a lo largo del tiempo, ver ecuación (2.11)

$$(m, t) = \varphi^{-1}(e, t) \quad (2.11)$$

Debido a que los puntos del sistema continuo y de la malla deben de coincidir, no pueden existir efectos convectivos en los cálculos Lagrangianos, es decir, la derivada del material debe ser una derivada temporal simple. Además, al conservarse en cada elemento el mismo número de partículas el cálculo computacional se ve reducido.

2.3.5.2 FORMULACIÓN EULERIANA

La formulación euleriana se emplea en modelos con presencia de fluidos, más concretamente en modelos de dinámica de fluidos o que el valor de sus deformaciones sea alto, en este último caso habría que asignar una malla fija en el espacio (malla Euleriana) y otra unida al material que se desplaza a través de la anterior (ver Figura 2.5). La desventaja de este método es a nivel computacional, ya que emplea muchos recursos, al ser mallas muy finas.

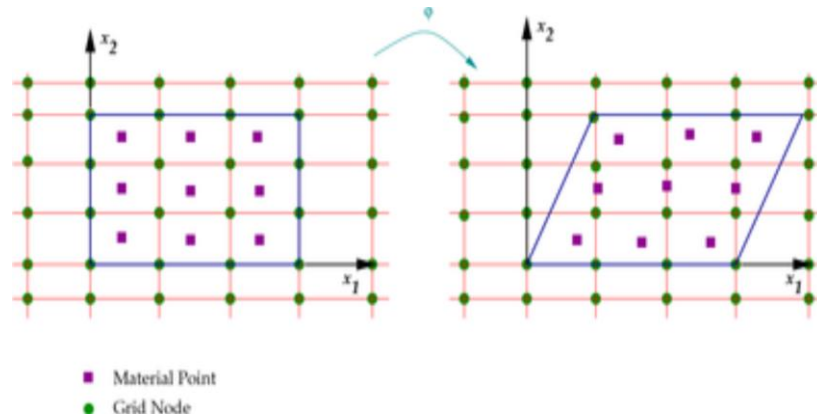


Figura 2.5 Método Euleriano (<https://prezi.com>).

A través de la formulación Euleriana se intenta subsanar los errores que tiene la formulación Lagrangiana cuando hay grandes deformaciones, y para ello se registra la cantidad de partículas que atraviesan una región fija del espacio. Ya que la malla euleriana es fija y la atraviesan las partículas de material que sufren deformaciones y desplazamientos.

La descripción Euleriana tiene en cuenta las variables pertenecientes a la malla fija en el espacio y las funciones de la dicha región. En este modelo la velocidad de los puntos materiales está expresado en función de los elementos fijos, sin tener en cuenta el sistema continuo inicial, ni las coordenadas materiales.

2.3.5.3 SMOOTH PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)

Este tipo de formulación se emplea cuando se producen enormes deformaciones en los materiales o está presente un fluido, como por ejemplo impactos a hipervelocidades. Este método tiene la característica que no utiliza ningún mallado para modelizar la estructura, sino que se utilizan partículas a las que se le asocia una masa y se le aplican las condiciones de equilibrio. Las partículas se pueden mover y deformarse libremente debido a la ausencia de malla, y se les aplica las ecuaciones de conservación en el dominio. (Ver Figura 2.6)

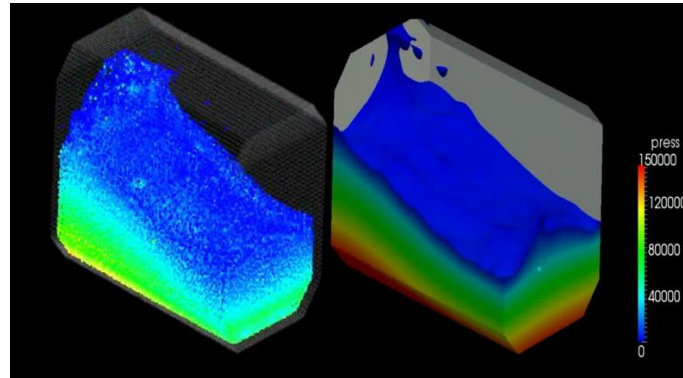


Figura 2.6 Tanque en movimiento lleno de fluido, simulado mediante SPH (<http://canal.etsin.upm.es>).

2.3.5.4 FORMULACIÓN LAGRANGIANA EULERIANA ARBITRARIA (ALE)

2.3.5.4.1 INTRODUCCIÓN

La formulación ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) se empezó a desarrollar durante los 90, para utilizarse en los problemas con contacto fluido-estructura. El método se utiliza en problemas donde existen grandes distorsiones y se necesita definir superficies libres, contactos solido-solido, fluido-fluido y solido-fluido. Por eso se utiliza en casos de dinámica de fluidos y en mecánica de sólidos no lineales, ya que es clave la correcta elección de la cinemática del sistema continuo y definir las relaciones entre la deformación de este y el mallado, lo que permite disminuir las distorsiones de otros modelos.

Esta nueva formulación es una especie de híbrido entre las formulaciones Lagrangiana y Euleriana ya que posee características de ambos, y así eliminando los inconvenientes de las dos formulaciones, que son:

- **Lagrangiano**, los nodos del mallado siguen las mismas trayectorias que los puntos materiales, aunque se consigue el seguimiento del sistema continuo, no es preciso en modelos con enormes distorsiones.
- **Euleriano**, los nodos de la malla permanecen fijos en el espacio, mientras el sistema continuo se mueve, pero el inconveniente es la visualización de detalles del flujo y la dificultad de establecer los contactos.

Así con esta nueva formulación se pretende corregir el máximo números de fallos posible de los dos métodos en los que se basa y unir las características más ventajosas.

2.3.5.4.2 CARACTERÍSTICAS

Una de las características del mallado del método ALE es que los nodos se pueden desplazar de manera arbitraria o permanecer fijos en el espacio o seguir la trayectoria de los puntos materiales, es decir, combina las dos características de los métodos anteriores (Ver Figura 2.7).

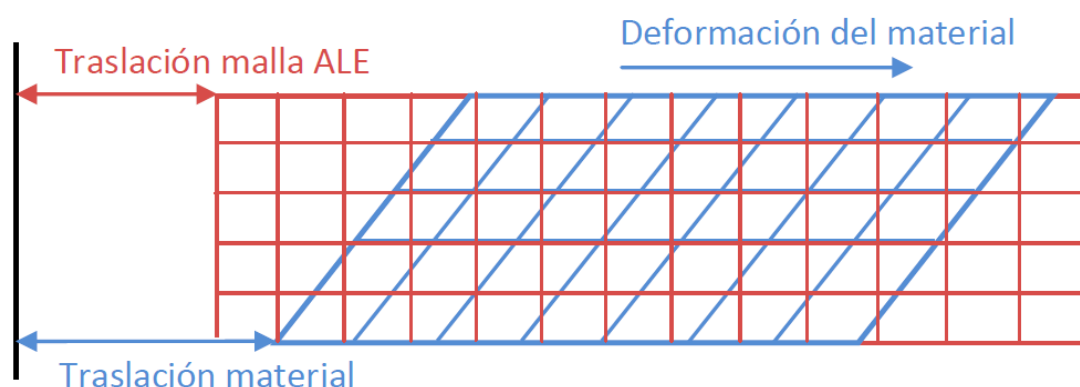


Figura 2.7 Descripción ALE [29].

El método empleado permite resolver problemas con grandes deformaciones por su arbitrariedad en el desplazamiento de la malla, lo que permite que los elementos analizados tengan mayor distorsión que en el método Lagrangiano, y quedando mallas tras la simulación de formas más regulares en el método ALE.

2.3.5.4.3 DESCRIPCIÓN DE MOVIMIENTO

La formulación originalmente fue desarrollada entre los años 60 y 70 pero no se introdujo al campo de los elementos finitos hasta uno años más tarde, los primeros trabajos a los que se aplicaron fueron el de Donea et al. (1977), Belytschko et al. (1978). Su fin era combinar las ventajas de la formulación Euleriana y Lagrangiana.

Para la descripción del movimiento del método ALE, sabiendo que se puede establecer que la malla se puede desplazar de forma arbitraria independientemente del movimiento del material, es necesario definir un dominio de referencia (R_r) para establecer los puntos coordenados del mallado. Este dominio es independiente del dominio material (R_m) y espacial (R_e).

El dominio de referencia puede ser mapeado mediante las funciones de mapeado del material (Ψ) o espaciales (Φ), por lo que la función de movimiento de las partículas es $\varphi = \Phi = \Psi^{-1}$, lo que significa que son 3 funciones dependientes. A continuación, en la Figura 2.8 las relaciones comentadas anteriormente.

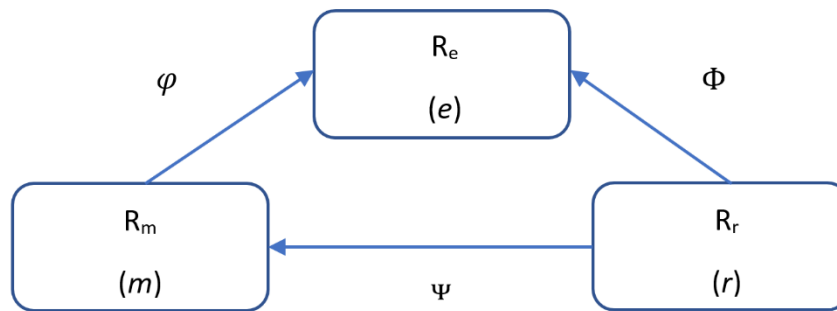


Figura 2.8 Descripción de la cinemática del método ALE.

La representación de las funciones de mapeo Φ y Ψ^{-1} son las siguientes:

$$\begin{aligned} \Phi: R_r \times [t_0, t_{final}] &\rightarrow R_e \times [t_0, t_{final}] \\ (r, t) &\rightarrow (e, t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi: R_m \times [t_0, t_{final}] &\rightarrow R_r \times [t_0, t_{final}] \\ (m, t) &\rightarrow (r, t) \end{aligned}$$

Pese a las ventajas del método ALE se necesita un algoritmo para definir de forma automática el desplazamiento de la malla.

2.3.5.4.4 MALLADO

El mallado del método ALE, como se ha mencionado antes puede trasladarse de manera independiente al sistema continuo, por eso se necesita que cada ciclo se actualice el mallado mediante la actualización de desplazamientos y velocidades nodales. Para ese proceso es necesaria la elección de un algoritmo, esta elección tendrá gran influencia sobre los resultados de la formulación ALE. A continuación, se muestran los dos métodos de actualización de mallado.

- **Regularización de la malla.** Consiste en conservar la malla lo más regular durante los cálculos, evitando distorsiones de la malla, y disminuyendo así los errores numéricos provocados por las grandes deformaciones.

En cada ciclo se actualiza la posición local de los nodos a partir de las velocidades y desplazamientos de la malla. Y el algoritmo empleado dependerá si se conocen las condiciones de contorno o no de las fronteras. Si es conocido el movimiento de las superficies del material, el movimiento de la malla se define mediante la interpolación simple la velocidad de la malla. En el caso de ser conocida una superficie de material, que es parte de la condición de contorno de la frontera,

su posición debe ser seguirse en cada instante. Tras conocerse los movimientos de las fronteras se puede calcular la nueva organización del mallado interior, mediante técnicas de interpolación.

- **Adaptación de la malla.** Este es el método utilizado cuando se utiliza en técnicas adaptativas el método ALE. Desplazando los nodos a zonas con grandes gradientes se consigue refinar la malla, y al ser una malla optimizada se reduce el tiempo computacional. A través de el algoritmo que posee el método ALE de indicador de error se va modificando el mallado hasta llegar a una distribución regular durante la simulación.

2.3.5.5 TIPOS DE UNIONES

Cuando están en contacto dos partes distintas del modelo debemos tener en cuenta que método se ha utilizado para cada una de ellas: si son dos partes Lagrangianas se define como un contacto; si se emplea en una parte formulación Euleriana o ALE y en otra Lagrangiana se produce un acoplamiento (*Coupling*), esto no significa que compartan el mismo nodo, sino que interactúan a través de un algoritmo de acoplamiento que genera fuerzas que se oponen a la penetración del material ALE o Euleriano en las partes Lagrangianas. (Ver Figura 2.9)

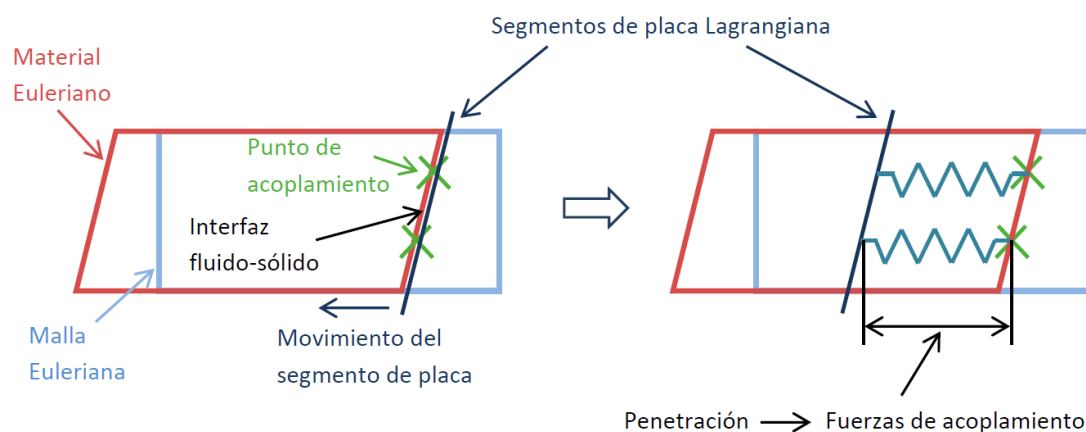


Figura 2.9 Algoritmo de acoplamiento [29].

Los nodos de las regiones adyacentes deben ser los mismos al de la región del material, para que el material pueda moverse por una zona común.

Además, para que el acoplamiento (Coupling) entre las mallas, mencionado anteriormente, estas mallas tienen que estar superpuestas una a otra (Ver Figura 2.10). de tal forma que las interacciones son resultado de las intersecciones de las mallas.

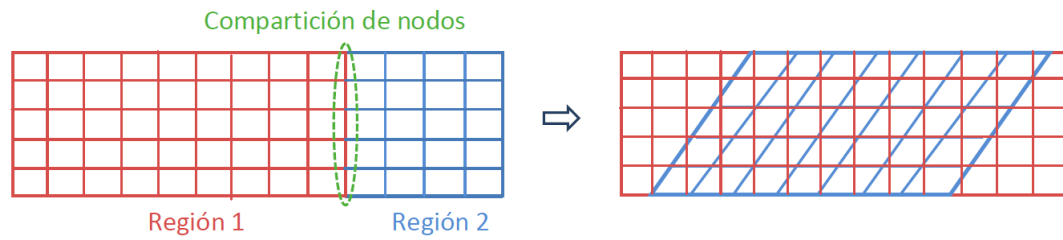


Figura 2.10 Compartición y superposición de las mallas [29].

CAPITULO 3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las características del modelo numérico de este proyecto son iguales a las del ensayo experimental llevado a cabo por David Varas et al sobre el Golpe Hidrodinámico en 2009, en la Universidad Carlos III de Madrid. Este proyecto consistía en el impacto a alta velocidad de un proyectil sobre un tanque que contiene agua, ya que poseía características equivalentes al queroseno, y su densidad y viscosidad son del mismo orden.

Los aspectos que estudian en dicho proyecto eran las presiones alcanzadas en el fluido, las deformaciones y desplazamientos de las paredes. Para ello se utilizaron recipientes de aluminio Al6063-T5 que simularan los depósitos integrados de las aeronaves, como se mencionó en el apartado 1.4 donde se habla del tipo de tanque y la estructura del ala donde se ubica dicho depósito. Las dimensiones del tanque para la simulación tratan de una sección cuadrada de 150 *mm* de lado y 750 *mm* de largo, teniendo un espesor interior estas placas de 2,5 *mm*. A parte, los extremos son de PMMA con las dimensiones de la sección cuadrada para poder grabar el impacto, y ya que hacía disminuir la flexión tras las ondas de presión. Las características del proyectil eran de 12.5 *mm* de diámetro y una masa de 8 *g*, este era de acero templado, para evitar deformaciones plásticas. En cambio, en las simulaciones que se hacen en este proyecto se cambiará el material de proyectil, por lo que la masa de este varía. Al igual que la masa las velocidades de 600 *m/s* y 900 *m/s* a la que eran lanzados los proyectiles de acero varían para conservar la energía cinética de los dos casos anteriores, para ello se emplean diferentes materiales.

Además, el porcentaje de llenado del tanque durante el impacto era variable de 60%, 70% y 100%, aunque en este proyecto solo se emplearan los porcentajes del 100% y 75%.

A continuación, en las siguientes figuras se muestran el modelo experimental y el esquema de distribución de los componentes que se colocaron en el tubo.

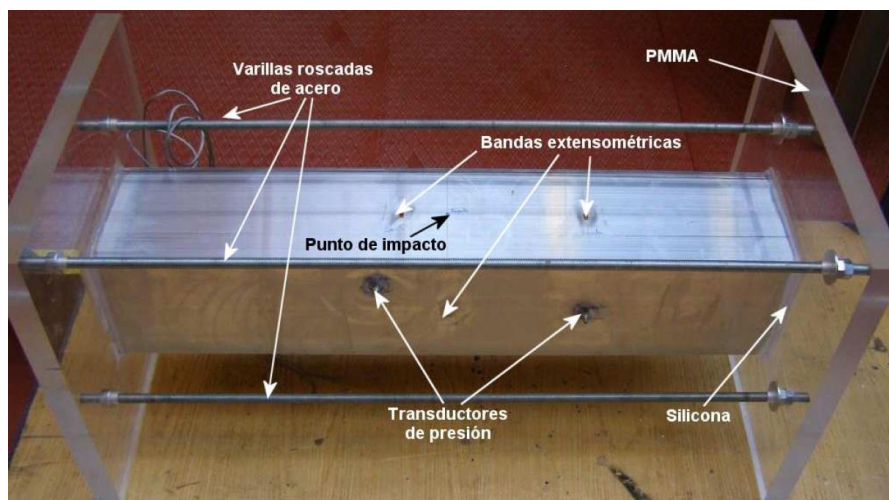


Figura 3.1 Fotografía del modelo experimental [2].

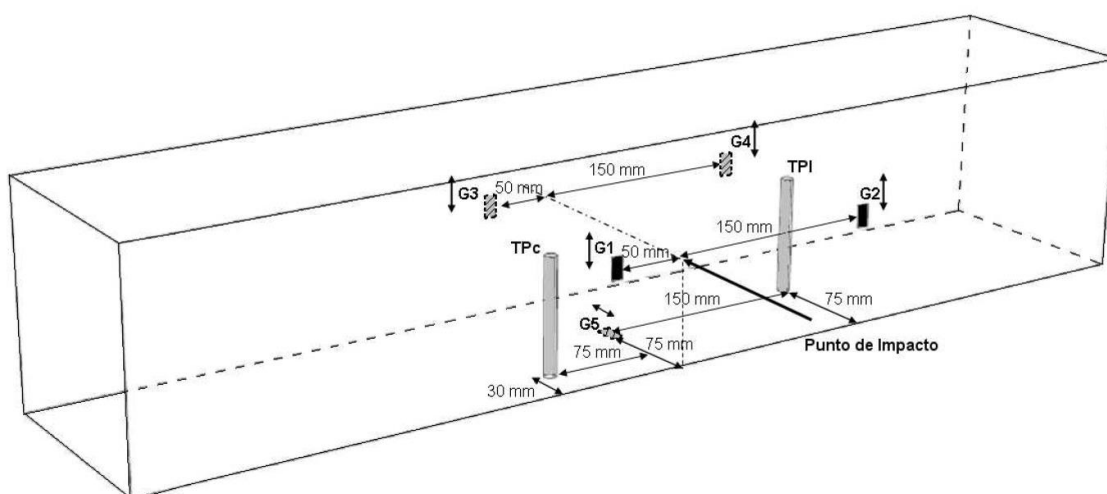


Figura 3.2 Esquema del modelo con medidas [2].

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En este apartado se describirá cada componente que se ha empleado en la simulación numérica mediante el código LS-DYNA, y diferentes factores que son necesarios para llevar a cabo la simulación y el posterior estudio de la influencia de las velocidades del proyectil en el Golpe Hidrodinámico, y las sollicitaciones y respuestas que suceden en la estructura.

3.2.1 GEOMETRÍA

A continuación, se muestran las características geométricas del tanque y el conjunto global del modelo (Ver Figura 3.3). El tanque posee dos planos de simetría cuando el

llenado al 100%, en los planos YZ y XZ (Ver Figura 3.4), mientras que si está parcialmente lleno solo se puede utilizar la simetría en el plano YZ.

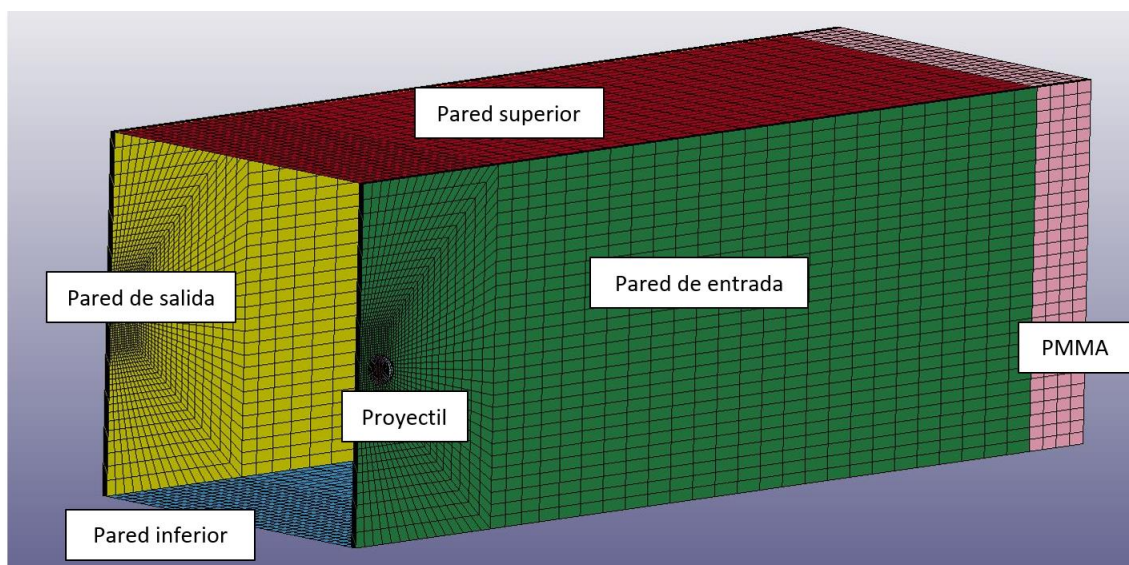


Figura 3.3 Componentes del modelo seccionado por la mitad.

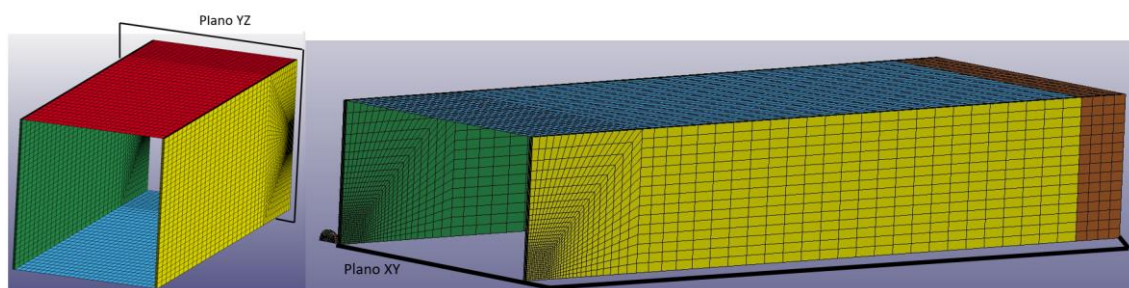


Figura 3.4 Simetría en el plano YZ (Dcha.). Simetría en el plano XZ (Izqda.).

En los siguientes puntos se detallará cada componente del modelo geoméricamente.

3.2.1.1 TANQUE

El tanque está formado por 4 paredes de aluminio (paredes de salida y entrada, y las dos paredes laterales) y dos paredes de PMMA como se puede ver en la anterior figura (Figura 3.3). En el punto anterior se explica que simetría se llevan a cabo según su fracción de llenado. En las zonas de contacto entre elementos se comparten los nodos para que el modelo actúe como un conjunto y no individualmente cada parte.

Las dimensiones del tanque que han sido nombradas en anteriores apartados se pueden observar en la Figura 3.5 y en la siguiente tabla (Tabla 3.1).

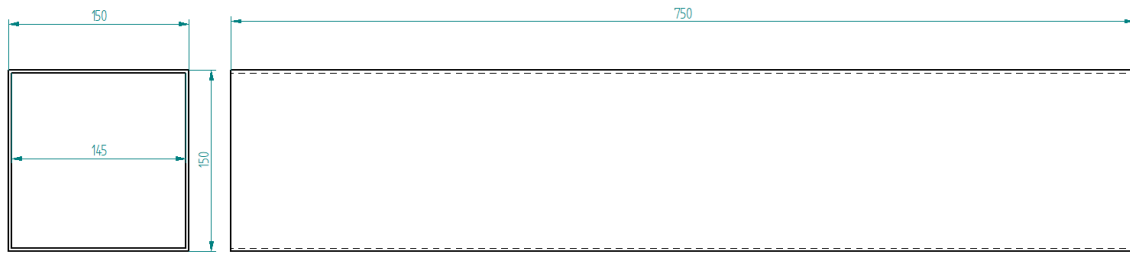


Figura 3.5 Plano acotado de tanque aluminio.

Tanque			
Largo	Ancho	Alto	Espesor
750 mm	150 mm	150 mm	2.5 mm

Tabla 3.1 Dimensiones del tanque.

Respecto al mallado, las paredes de entrada y salida son elementos sólidos que se mallan con elementos Lagrangianos hexaédricos, son 5 capas de 0.5 mm de alto cada uno, además la malla se refina en la zona de impacto, es decir, hay mayor número de elementos, y por lo tanto de nodos cerca del impacto, así se consiguen resultados más precisos. Para ello ver la Figura 3.6.

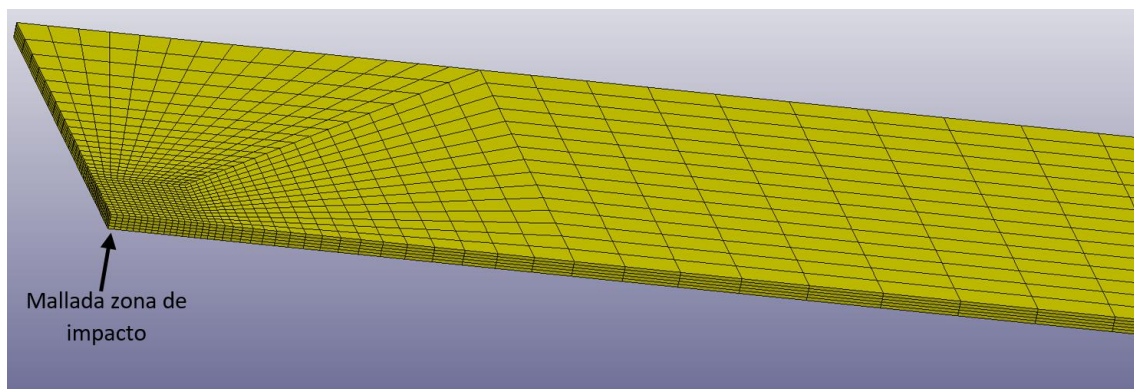


Figura 3.6 Mallado de las paredes de entrada y salida.

En cambio, las paredes laterales se mallan mediante elementos “Shell” que genera una malla bidimensional, ya que no se necesita una malla refinada, y así se ahorra tiempo computacional. En esta malla hay igual un refinamiento en la zona más cercana al impacto, debido que los nodos de las fronteras deben coincidir entre los elementos (Ver Figura 3.7).

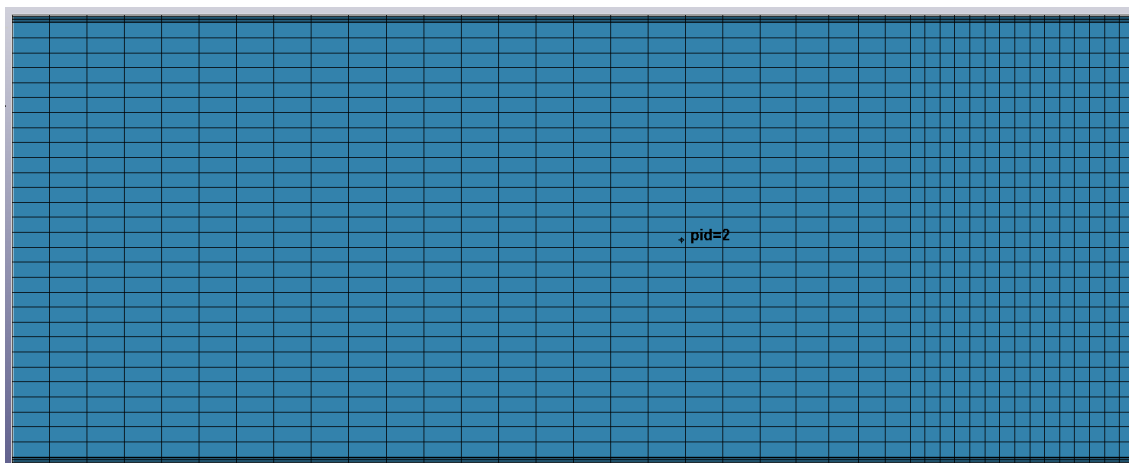


Figura 3.7 Mallado paredes laterales.

3.2.1.2 PROYECTIL

El proyectil es un elemento esférico, que al igual que las paredes de entrada y salida ha sido modelizado a través de un elemento sólido, permitiendo así obtener resultados refinados tras la interacción con las paredes contra las que impacta. Y al igual que el tanque tiene dos planos de simetría y dependiendo del fraccionado del fluido interior así se le aplican los diversos planos de simetría. Ver Tabla 3.2 para ver la dimensión y la Figura 3.8 para ver la esfera mallada.

Proyectil
Diámetro
12.5 mm

Tabla 3.2 Dimensiones del proyectil.

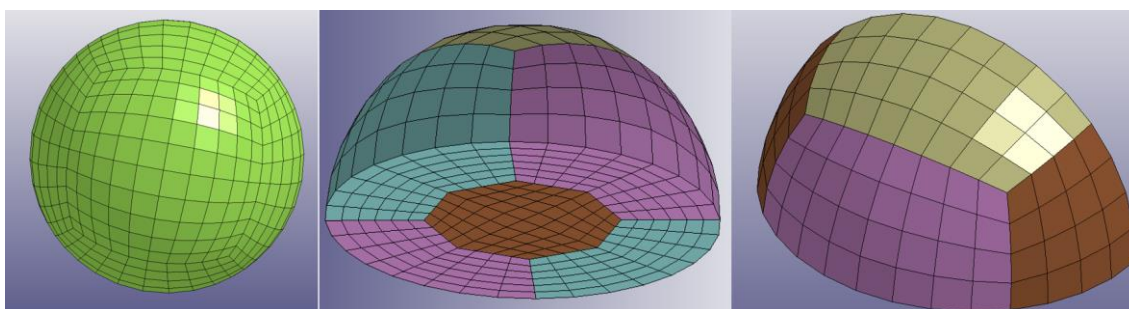


Figura 3.8 Proyectil esférico mallado (Izqda.). Proyectil con deposito al 75% de agua, un plano de simetría (Central).
Proyectil con deposito al 100% de agua, dos planos de simetría (Drcha.).

3.2.1.3 FLUIDOS

El modelo consta de dos fluidos en el exterior, aire, y en el interior, agua en el modelo de fraccionado 100%, y agua y aire en del 75%.

En el mallado los nodos de fluido en contacto con otro fluido se identifican con un mismo nodo, para conseguir que actúen como un medio continuo y al igual que las paredes y el proyectil se consideran planos de simetría. Para el mallado se utilizan elementos hexaédricos con formulación ALE, esto se indica en el código LS-DYNA mediante el comando ELFORM=11.

3.2.2 MATERIALES

En este apartado se van a describir los materiales empleados y definidos en el programa individualmente con los parámetros usados en el código.

3.2.2.1 TANQUE

Las paredes laterales, y de entrada y salida, que forman parte del estanque están fabricadas con aluminio 6063T-5 con las propiedades de la Tabla 3.3

Aluminio Al6063-T5		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
2700 Kg/m ³	71·10 ⁹ N/m ²	0.33

Tabla 3.3 Propiedades del Al 6063-T5.

Para la modelización de este material se emplea el modelo *Johnson-Cook* [30], este modelo se utiliza en este caso, ya que es un elemento sólido al que se le añade una ecuación de estado. A continuación, se expresa la variación de esfuerzos en el material según este método, véase ecuación (3.1).

$$\sigma_y = (A + B(\bar{\epsilon}^p)^n) \left(1 + C \log \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}^0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \right)^m \right) \quad (3.1)$$

Donde,

- σ_y es el límite elástico.
- $\bar{\epsilon}^p$ es la deformación plástica equivalente.
- $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ es la velocidad de deformación plástica equivalente.
- θ_0 es la temperatura de referencia.
- θ_m es la temperatura de fusión.

- A, B, C, n y m son parámetros del material.

A continuación, se muestran en la Tabla 3.4 los valores de esos parámetros, extraídos del modelo ya realizado por David Varas et al. [2] y de los trabajos de Karagiozava et al. [31] Y del de Yang [32]. Además, hay que tener en cuenta que la eliminación de elementos sucede para el valor crítico de la deformación plástica, ε_f .

Aluminio Al6063-T5					
A	B	C	m	n	ε_f
200 MPa	144 MPa	0	1	0.62	0.2

Tabla 3.4 Parámetros ecuación de Johnson-Cook.

Ahora se necesita definir una ecuación de estado, esta define la relación entre las variables de estado para que el sistema esté en equilibrio termodinámico. En este caso se le asocia al modelo elegido una ecuación *Linear Polynomial* [30] (Ver ecuación (3.2)).

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3.12)$$

Donde, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$, con ρ es la densidad actual y ρ_0 la de referencia.

En la Tabla 3.5 se muestran los valores de los coeficientes de la ecuación (3.2).

EOS Linear Polynomial (Al 6063-T5)	
$C_0 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6$	0
C_1	70

Tabla 3.5 Coeficientes EOS Linear Polynomial (Al 6063-T5).

El valor del parámetro C_1 corresponde al módulo de compresibilidad del material.

3.2.2.2 VENTANA DE PMMA

Para la ventana de polimetilmetacrilato (PMMA), al ser un elemento que no presenta deformaciones plásticas, ni desplazamientos se ha utilizado en la modelización un material elástico lineal, con las siguientes propiedades registradas en la Tabla 3.6 obtenidas de Vesenjok et al [33].

Polimetilmetacrilato (PMMA)		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
1180 Kg/m ³	3·10 ⁹ N/m ²	0.35

Tabla 3.6 Propiedades de la ventana de PMMA.

3.2.2.3 PROYECTIL

A continuación, se describen individualmente cada material con su modelo utilizado para la modelización del proyectil.

3.2.2.3.1 ACERO

Para la modelización de acero se emplea un material elástico lineal, ya que no sufre deformaciones plásticas. Sus propiedades se muestran en la Tabla 3.6.

Acero		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
7830 Kg/m ³	207·10 ⁹ N/m ²	0.28

Tabla 3.7 Propiedades del acero.

3.2.2.3.2 ALEACION DE TUNGSTENO (WHA)

Para la modelización de la aleación de tungsteno, cuyas propiedades están en la Tabla 3.8, se utiliza el modelo de Johnson-Cook definido en la ecuación (3.1) con los siguientes valores de los parámetros recogidos en la Tabla 3.9.

Aleación de Tungsteno (WHA)		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
17650 Kg/m ³	314·10 ⁹ N/m ²	0.34

Tabla 3.8 Propiedades del WHA [31].

Aleación de Tungsteno (WHA)				
A	B	C	m	n
1505.8 MPa	176.5 MPa	0.016	1	0.12

Tabla 3.9 Parámetros de Johnson-Cook para la aleación de Tungsteno (WHA) [31].

Para el cálculo del valor crítico de la deformación de fractura se emplea la siguiente ecuación [30].

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (3.3)$$

Y los parámetros D_i de esa ecuación son los recogidos en la Tabla 3.10.

Aleación de Tungsteno (WHA)				
D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0	0.33	-1.5	0.042	0

Tabla 3.10 Parámetros para cálculo de ε_f de la aleación de Tungsteno (WHA) [31].

La ecuación de estado empleada es una *Linear Polynomial* como la ya mencionada ecuación (3.2) y con los parámetros de la Tabla 3.11.

EOS Linear Polynomial (Aleación de Tungsteno (WHA))	
$C_0 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6$	0
C_1	350

Tabla 3.11 Coeficientes EOS Linear Polynomial (WHA).

Siendo el parámetro C_1 el módulo de compresibilidad de la aleación de Tungsteno.

3.2.2.3.3 TITANIO

La modelización del titanio al igual que acero se le considera un material completamente elástico y que no sufre deformaciones plásticas. Y sus propiedades se registran en la Tabla 3.12.

Titanio		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
4507 Kg/m ³	107·10 ⁹ N/m ²	0.34

Tabla 3.12 Propiedades del titanio.

3.2.2.3.4 PLOMO-RÍGIDO

Este material elástico empleado tendrá la densidad y el coeficiente de poisson del plomo, pero su módulo de Young será muy alto para evitar que el proyectil sufra deformaciones, y se pueda comparar con el resto de materiales al conserva siempre la geometría inicial. A continuación, en la tabla 3.13 se muestran los valores. No se ha simulado con las características completas del plomo debido a que sufre grandes deformaciones el proyectil, como ya se comentara más delante.

Plomo Rígido		
Densidad	Módulo de Young	Coef. Poisson
11340 Kg/m ³	1000·10 ⁹ N/m ²	0.44

Tabla 3.13 Propiedades del Plomo Rígido.

El orden magnitud seleccionado será una vez mayor que el del acero.

3.2.2.4 FLUIDOS

En este punto se detallan las propiedades del agua y aire que intervienen en el modelo simulado.

3.2.2.4.1 AGUA

Las propiedades del agua se muestran en la tabla 3.14.

Agua	
Densidad	Viscosidad dinámica
1000 Kg/m ³	8.9·10 ⁻⁴ Pa s

Tabla 3.14 Propiedades del agua.

Este material se modelizado mediante un *Material Null* [30], a través de una ecuación constitutiva viscosa como se muestra en la ecuación (3.4).

$$\sigma_{ij} = 2\nu_d \dot{\varepsilon}'_{ij} - P\delta_{ij} \quad (3.4)$$

Donde,

- σ_{ij} es el tensor de Cauchy.
- ν_d es la viscosidad dinámica.
- $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ es el desviador de la velocidad de deformación.
- δ_{ij} es el tensor de identidad de orden dos.
- P es la presión y viene definida por la ecuación de estado de *Gruneisen* [30] que consiste en la presión de materiales sometidos a compresión en la ecuación (3.5) o a expansión en la ecuación (3.6).

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left(1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right)}{\left(1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right)^2} + (\gamma_0 + a\mu^2)E \quad (3.5)$$

$$P = P_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu^2)E \quad (3.6)$$

Donde,

- S_1 , S_2 y S_3 son coeficientes de la curva velocidad de onda (v_s) frente a velocidad de partícula (v_p).
- C es la ordenada en el origen.
- γ_0 es la gamma de Gruneisen.

- a es un parámetro de corrección del volumen.
- E es la energía interna por unidad de volumen.

Y los valores de los coeficientes anteriores esta recogidos en la Tabla 3.15, y son extraídos del modelo realizado por David Varas [2] que provienen del trabajo de Boyd et al. [32].

Parámetros de Gruneisen (Agua)				
C	S_1	$S_2=S_3$	γ_0	a
1448 m/s	1.979	0	0.11	3

Tabla 3.15 Parámetros de Gruneisen del agua.

3.2.2.4.2 AIRE

Para el aire al igual que el agua se selecciona *Material Null* y se utiliza la ecuación constitutiva (3.4), esta agua permite que el fluido interior pueda desplazarse al exterior permitiendo que interactúe con las paredes y las deforme. Las propiedades del aire se muestran en la Tabla 3.16.

Aire	
Densidad	Viscosidad dinámica
1.22 Kg/m ³	1.77·10 ⁻⁵ Pa s

Tabla 3.16 Propiedades del agua.

Para este material se emplea una ecuación de estado tipo *Linear Polynomial* como la que se definió en la ecuación (3.2) y sus coeficientes se encuentran en la Tabla 3.17.

EOS Linear Polynomial (Aire)	
$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6$	0
$C_4 = C_5 =$	$\gamma - 1 = 0.4$

Tabla 3.17 Coeficientes EOS Linear Polynomial (Agua).

Donde γ es el cociente entre calores específicos que se muestra en la ecuación (3.7).

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.4 \quad (3.7)$$

Quedando la ecuación resultante de la (3.2) de la siguiente forma,

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (3.8)$$

3.2.3 CONTACTOS

Se produce durante la interacción de dos partes que se definieron con elementos Lagrangianos, estos contactos se deben predecir en todo el modelo para poder definirlos antes de llevar a cabo la simulación.

Los contactos que se producen en el modelo simulado serán el del proyectil con las paredes de entrada y salida que es donde impacta. Este contacto se define a través de la opción *Contact Automatic Surface to Surface* (Ver Figura 3.9)

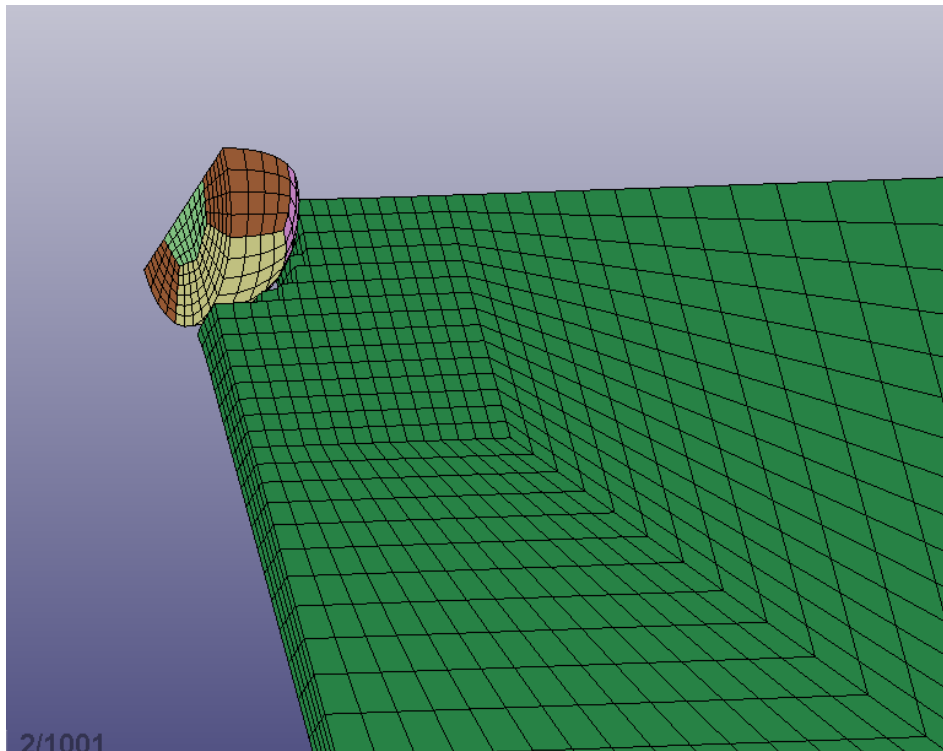


Figura 3.9 Contacto proyectil- pared de entrada.

Los contactos entre las diferentes caras del tanque no se definen de ninguna forma, sino que mediante el comando *merger* se consigue que los dos nodos que ocupan la misma posición se unan en uno dando continuidad al modelo.

3.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones aplicadas al modelo son las de simetría en el plano medio de tanque dependiendo del volumen de llenado del tanque, estas acciones afectarán a la interacción fluido-estructura. Además, se deberán establecer las condiciones iniciales. A continuación, se describen con detalle lo mencionado en este punto.

3.2.4.1 SIMETRÍA DEL MODELO

La simetría en el modelo se lleva a cabo para reducir el tiempo de simulación, el tiempo de diseño y la complejidad del modelo.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores existen dos planos de simetría respecto a los planos YZ y XZ según la fracción de llenado. Esto implica que el caso del depósito completamente lleno solo es necesario un cuarto de la geometría del modelo para llegar a los resultados de todo el tanque, ya que se obtiene extrapolando los resultados. En cambio, para el depósito con una fracción inferior al 100% solo se puede aplicar una condición de simetría en el plano medio de la longitud del tanque, y al igual que en el caso anterior se extrapola para tener los resultados completos del tanque.

Para la simetría es necesario crear un conjunto de nodos independientes en el plano de la simetría para aplicar las restricciones de cada plano, estas restricciones de giros y desplazamientos se encuentran en la Tabla 3.18.

Restricciones nodales del movimiento	
Plano de simetría XZ	Plano de simetría YZ
Rotación según el eje X	Traslación según el eje X
Traslación según el eje Y	Rotación según el eje Y
Rotación según el eje Z	Rotación según el eje Z

Tabla 3.18 Restricciones nodales.

3.2.4.2 INTERACCIONES FLUIDO-ESTRUCTURA

La interacción fluido estructura se produce entre los elementos Lagrangianos y el fluido definido con la formulación ALE, en el código LS-DYNA se define con el comando *Constrained Lagrange in solid*, que impide que la malla de fluido penetre en la de la estructura. Para ello hay unas fuerzas de penalización que se comportan como si se tratase de un muelle, además son proporcionales a la profundidad a la que penetran y a la rigidez. El acoplamiento se debe hacer correctamente con los vectores normales de las partes Lagrangianas orientadas hacia los fluidos ALE.

3.2.4.3 CONDICIONES INICIALES

La condición inicial que se establece en los modelos es la de la velocidad de impacto del proyectil en la dirección del eje Z sentido positivo, diferente para cada caso.

3.2.5 TIEMPO DE SIMULACIÓN

El tiempo que se ha determinado para las simulaciones es de 10 *ms*, para que los desplazamientos y las deformaciones se estabilicen en un valor constante, es decir, los materiales se recuperen elásticamente y que solo se aprecien las deformaciones definitivas permanentes, plásticas. De tal forma que permita el análisis de los desplazamientos del tanque, también cabe destacar que el tiempo de estabilización para cada caso será diferente debido a que varía la velocidad de impacto y el material del proyectil, para ello se acepta el tiempo de 10 *ms* que se empleó en trabajos anteriores con el proyectil de acero.

3.3 VALIDACIÓN NUMÉRICA

La validación numérica del modelo de acero fue realizada en un estudio anterior de David Varas [2], en él se detalla todo el proceso, así como la comparativa de datos experimentales y numéricos, que confirman la semejanza de resultados.

En este trabajo no se validan los modelos de titanio, aleación de tungsteno ni el plomo rígido, pero se puede suponer que la estructura del tanque y los fluidos actuarán de la misma forma que en el modelo validado, ya que solo se varía el material del proyectil, pero nunca la forma de este ni sus dimensiones, y tampoco el tanque ni el material ni las dimensiones.

3.4 CASOS ANALIZADOS

En este proyecto se va analizar la influencia de la velocidad a misma energía cinética en el Golpe Hidrodinámico, y como afecta en la estructura del tanque y los diferentes parámetros de fluido y paredes.

Para ello se harán casos a dos energías cinéticas distintas, partiendo de la energía cinética de los proyectiles de acero a 600 y 900 *m/s*. Y a partir de esas energías mediante la ecuación (3.9) de cálculo de la energía cinética se despeja velocidad de los proyectiles de otros materiales, ver Tabla 3.19 de las velocidades e proyectil. Se mantendrá constante las dimensiones del proyectil.

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} m_i \cdot v_i^2 = constante \Rightarrow v_i^2 = \left(\frac{\rho_{acero}}{\rho_i} \right)^{1/2} \cdot v_{acero} \quad (3.9)$$

Donde,

- m_i es la masa del proyectil que es igual a volumen (vol) por densidad (ρ_i).
- ρ_i es la densidad del proyectil.
- v_i es la velocidad del proyectil.

Velocidades de proyectiles		
Material	Caso Energía cinética máxima (3242.99 J)	Caso Energía cinética mínima (1441.33 J)
Acero	900 m/s	600 m/s
Aleación Tungsteno	600 m/s	400 m/s
Titanio	1186 m/s	790 m/s
Material elástico	748 m/s	499 m/s

Tabla 3.19 Velocidades de proyectil para cada caso.

Además, estos casos se modelizarán con el tanque lleno al 75% y al 100% para las dos energías cinéticas con las que se trabaja.

Los materiales empleados son materiales que no sufren deformaciones en su geometría durante el impacto debido a su rigidez, el material elástico empleado con las propiedades del plomo, pero con un módulo de Young de un orden superior al acero, sustituye al plomo, ya que el plomo modelizado de manera real sufría grandes deformaciones geométricas tras el impacto como se aprecia en la Figura 3.10

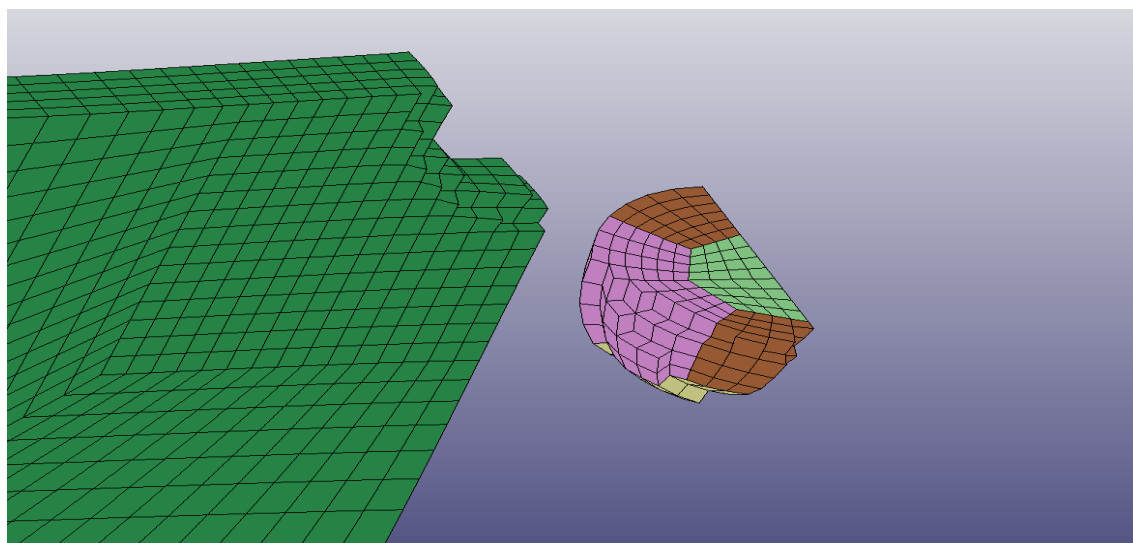


Figura 3.10 Proyectil de plomo impactando y sufriendo pérdida de material.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los resultados numéricos obtenidos para cada modelo, para simplificar se muestran los resultados del caso de mayor energía cinética, ya que el caso de menor energía es similar cualitativamente. Si los resultados mostrados difieren entre los dos casos se añadirán los dos y se procederá a especificar cada caso. También en cada punto se explicará los resultados obtenidos y las causas posibles que hayan sido el motivo de estos.

4.2 RESULTADOS

Se mostraran todos los puntos analizados de las simulaciones a continuación.

4.2.1 FASES GOLPE HIDRODINÁMICO

A continuación, se procede a mostrar las fases del Golpe Hidrodinámico en los casos de que el proyectil es lanzado a mayor energía cinética, y con la fracción de llenado del 100% y el 75%. Además permite mostrar la evolución de las cavidades para cada material, así como las dimensiones de esta en cada caso y los desplazamientos de las paredes del tanque según la fase en la que se encuentra.

4.2.1.1 FASE CHOQUE

Fase de choque se produce cuando impacta el proyectil en la pared de entrada y comienza a generarse la cavidad. En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestra el tanque lleno al 100% cortado a un cuarto con cada material impactando y en la siguiente el tanque al 75% cortado a un medio, respectivamente.

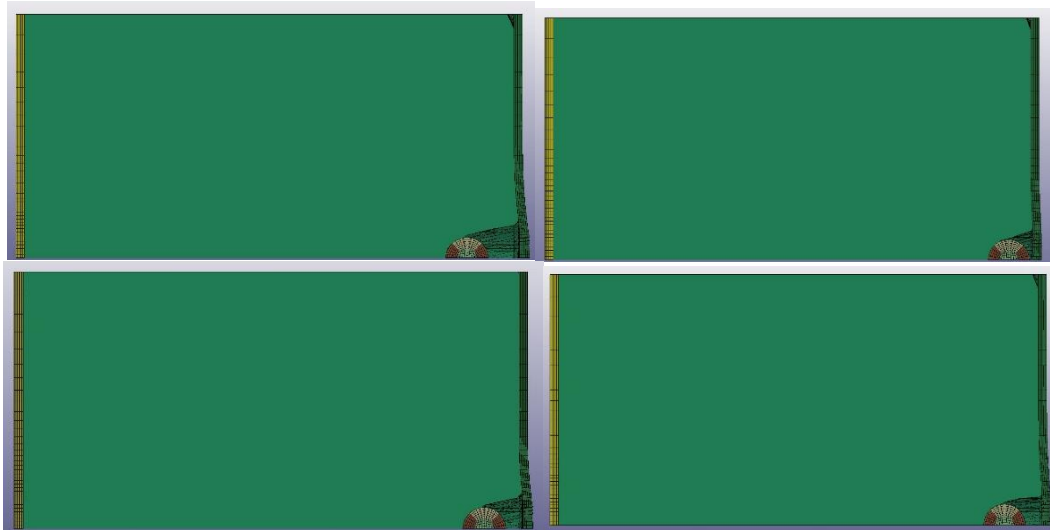


Figura 4.1 Fase de choque para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).

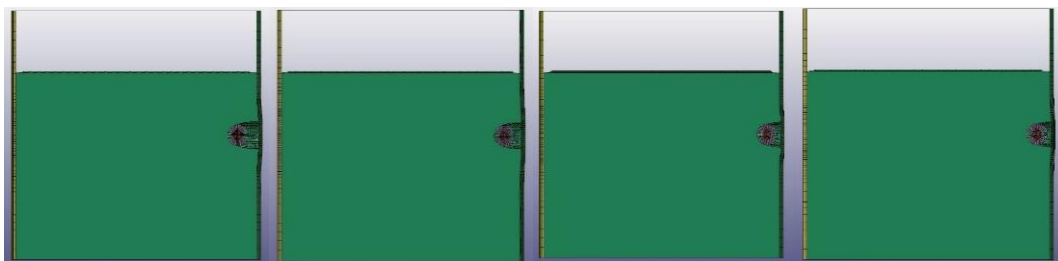


Figura 4.2 Fase de choque para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).

4.2.1.2 FASE RESISTENTE

La fase resistente es la fase en la que el proyectil atraviesa el fluido mientras transfiriere su energía cinética a este, y con ello se produce la pérdida de velocidad. A continuación, en las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran esta fases para todos los materiales en los casos de energía máxima con porcentajes de llenado de 100% y 75%.

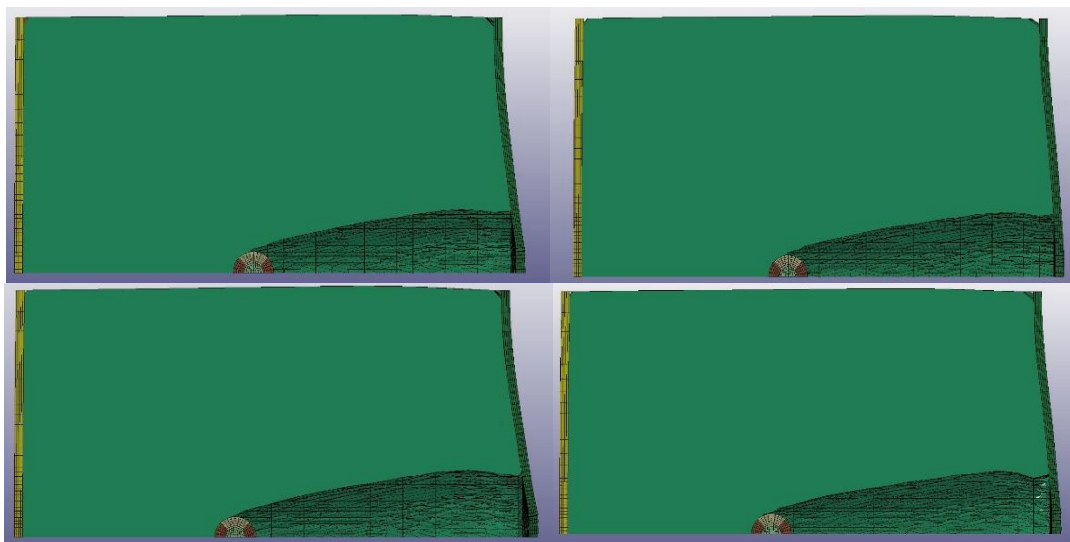


Figura 4.3 Fase resistente para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).

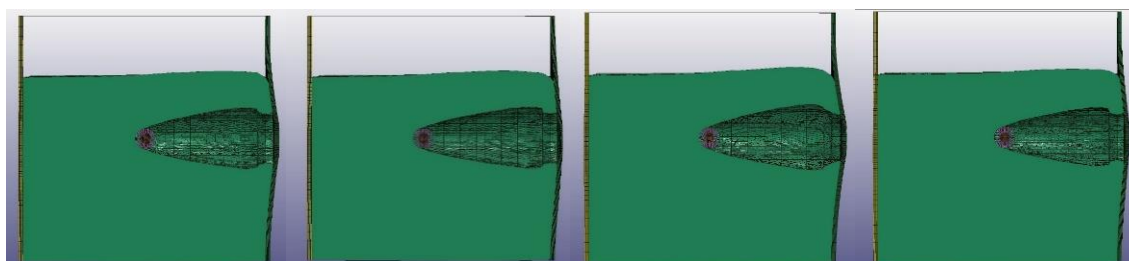


Figura 4.4 Fase resistente para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).

4.2.1.3 FASE DE CAVITACIÓN

La fase de cavitación se da simultáneamente a la fase resistente, en ella la transferencia radial de la velocidad genera una cavidad, la cual depende de la velocidad y densidad del material. En las siguientes Figuras 4.5 y 4.6 se muestra dicha fase para cada material y las dos fracciones de llenado con las que se realiza el estudio, primero el mayor porcentaje y después el menor.

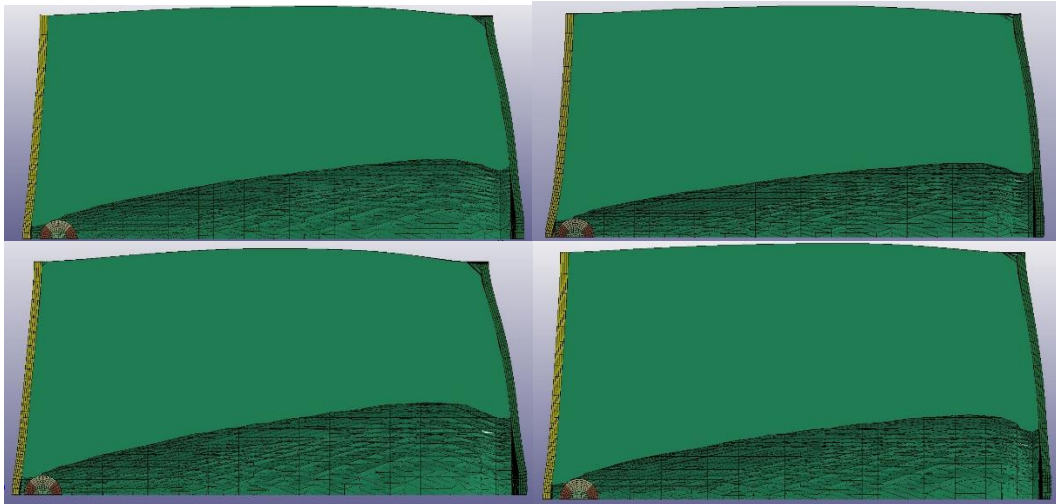


Figura 4.5 Fase de cavitación para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).

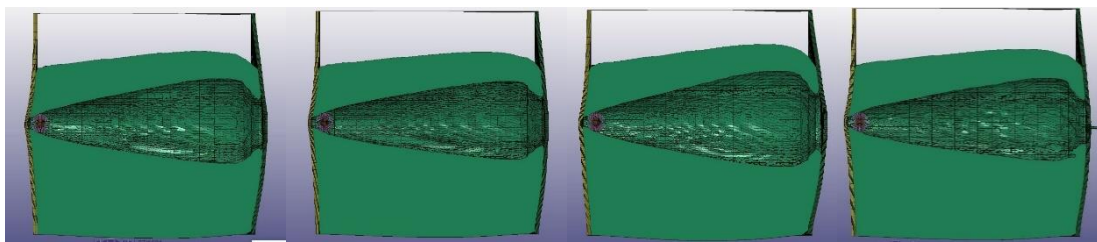


Figura 4.6 Fase de cavitación para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%).

4.2.1.4 FASE DE SALIDA

La fase de salida como el nombre indica sucede cuando el proyectil perfora la pared de salida y deja de interactuar al fluido interior, es decir, deja de haber intercambio de energía fluido-proyectil y proyectil-estructura, esta última sucede en la entrada y salida del proyectil. En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestra la fase anteriormente nombrada y la forma de la cavidad que se genera del porcentaje de llenado 100% y 75%, respectivamente.

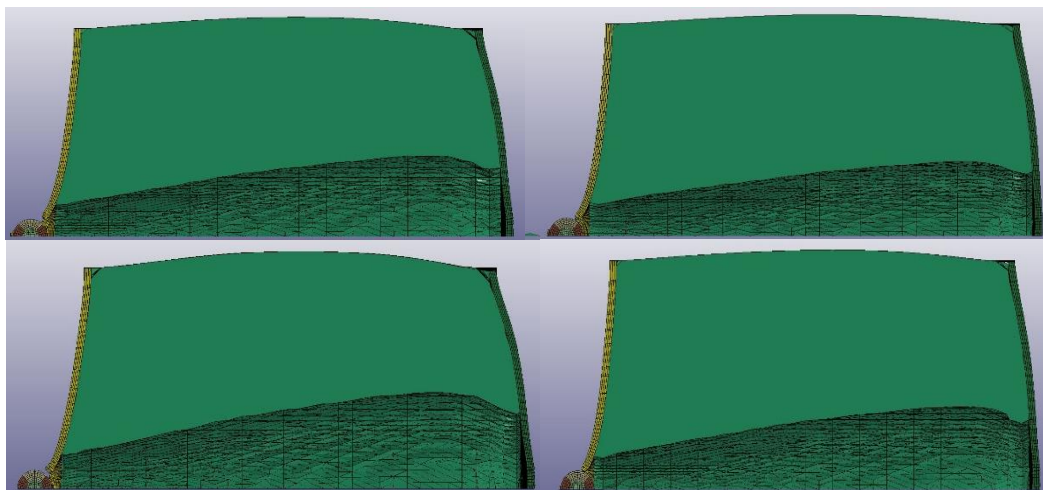


Figura 4.7 Fase de salida para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 100%, energía cinética máxima).

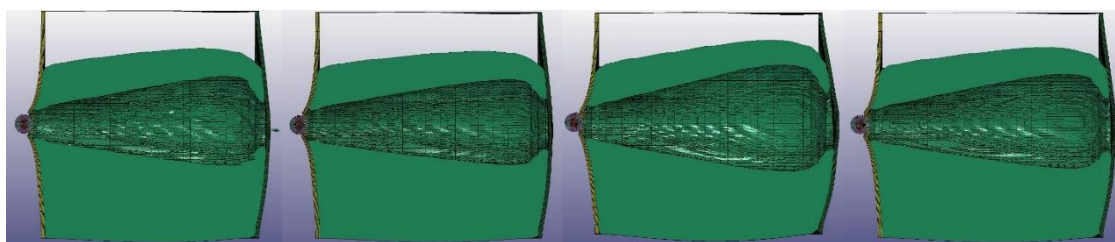


Figura 4.8 Fase de salida para proyectil de acero, WHA, Titanio y Material elástico respectivamente de izquierda a derecha y de arriba a abajo (llenado del 75%, energía cinética máxima).

4.2.1.5 ANALISIS DE FASES DEL GOLPE HIDRODINAMICO

Como se puede observar en las figuras del apartado 4.2.1 la evolución de las cavidades es similar en los mismos puntos de avance del proyectil, pero no en el mismo instante, ya que cada proyectil viaja a distinta velocidad. El tamaño de la cavidad depende de la velocidad en los lanzamientos a una misma energía cinética, es decir, dependen del material. Se observa que a una mayor velocidad de impacto, las cavidades generadas son menores cuando el proyectil se encuentra en el mismo punto como se observa en las figuras, esto se debe a que el proyectil atraviesa más rápido el fluido, y este tarda en transferir el movimiento entre toda sus partículas de fluido, a pesar de que la transferencia de energía sea mayor. Esto sucede igual en los dos casos de diferentes energías cinéticas y en sus subapartados que corresponden al 100% y al 75% de llenado.

Viendo esta evolución se determina que para los casos de igual energía y misma fracción la cavidad creada es menor cuando mayor es la velocidad siempre que el proyectil este dentro del tanque o saliendo.

4.2.2 VELOCIDAD Y POSICIÓN DEL PROYECTIL

En este punto se analiza la trayectoria del proyectil y de la velocidad, durante los 10 ms que se establece la simulación, esto permite ver cuando impacta y sale el proyectil. También muestra cómo afecta el fluido en la velocidad al ser atravesado según el material que se emplea.

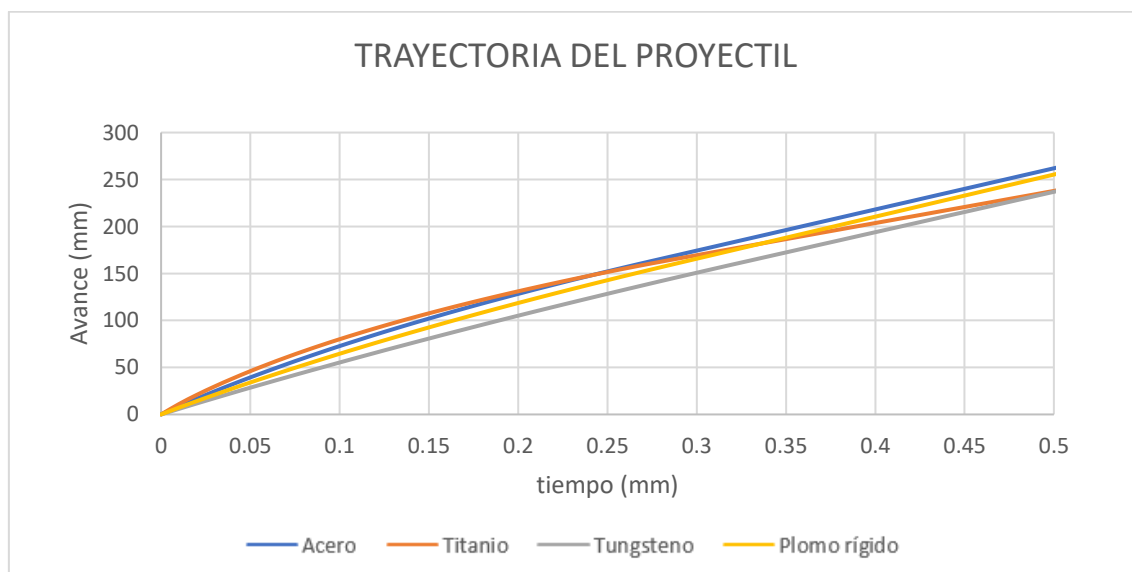
Además en el caso de llenado del 75% se muestra la influencia de las diferentes masas, superior (agua y aire) e inferior (agua) que hay sobre el proyectil dentro del tanque. Esta influencia se muestra con el desplazamiento en el eje vertical.

Primero se muestran las gráficas de la trayectoria del proyectil para las dos fracciones de llenado y a continuación la velocidad del proyectil en la dirección de avance.

4.2.2.1 TRAYECTORIA

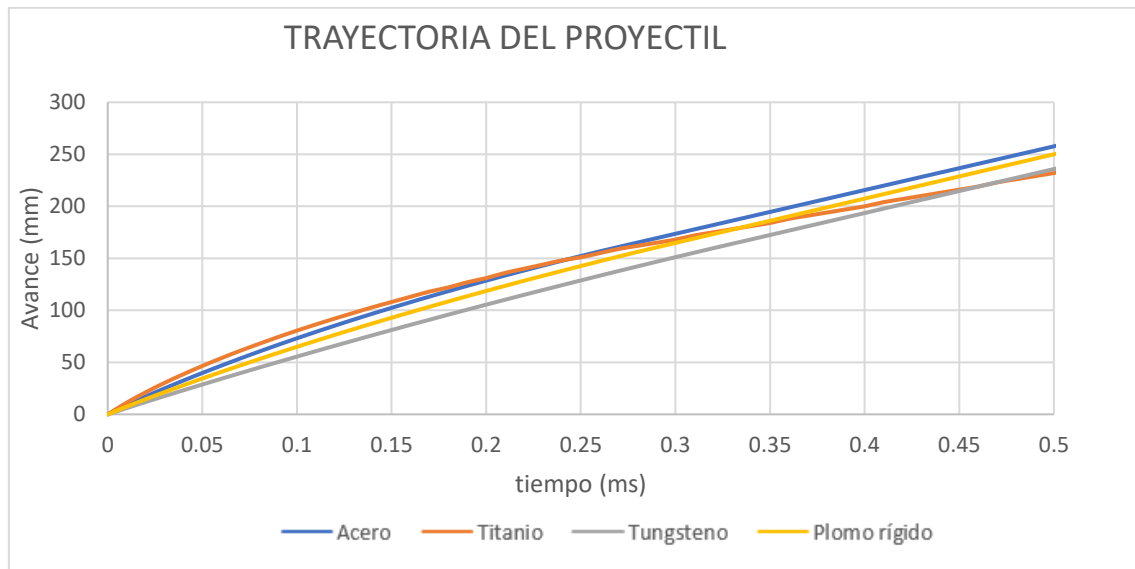
Se muestran las trayectorias para los dos porcentajes de llenado en el caso de energía cinética máxima en las Gráficas 4.1, 4.2 y 4.3.

4.2.2.1.1 Llenado 100%

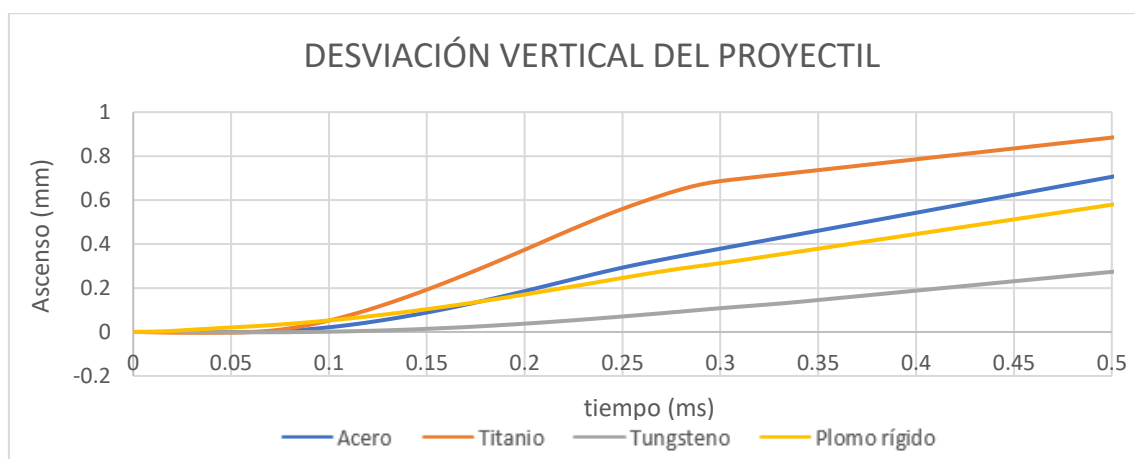


Gráfica 4.1 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.2.1.2 Llenado 75%



Gráfica 4.2 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).

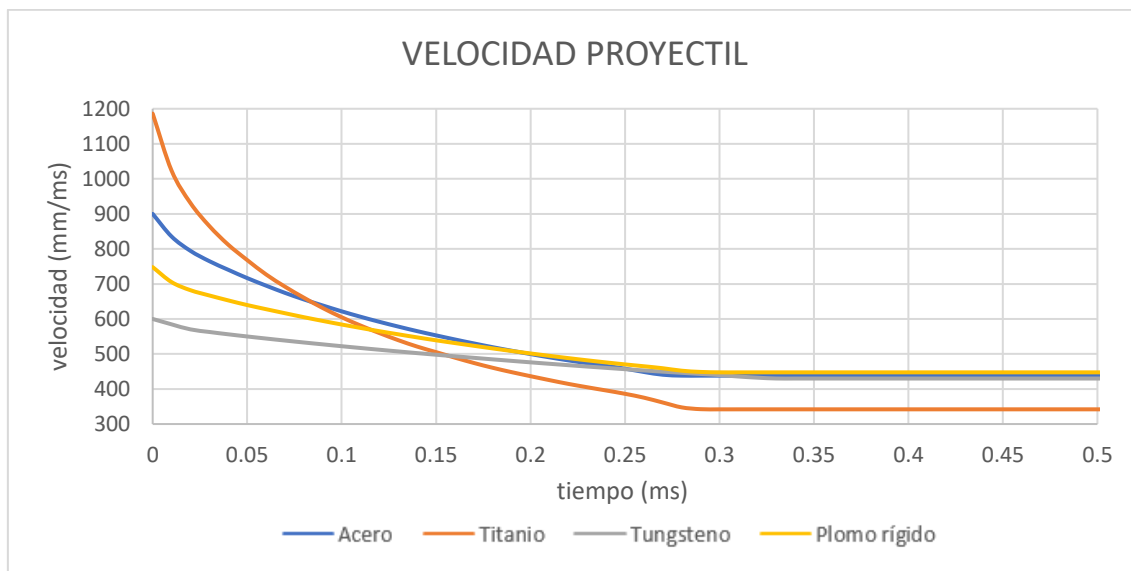


Gráfica 4.3 Evolución trayectoria proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.2.2 VELOCIDAD

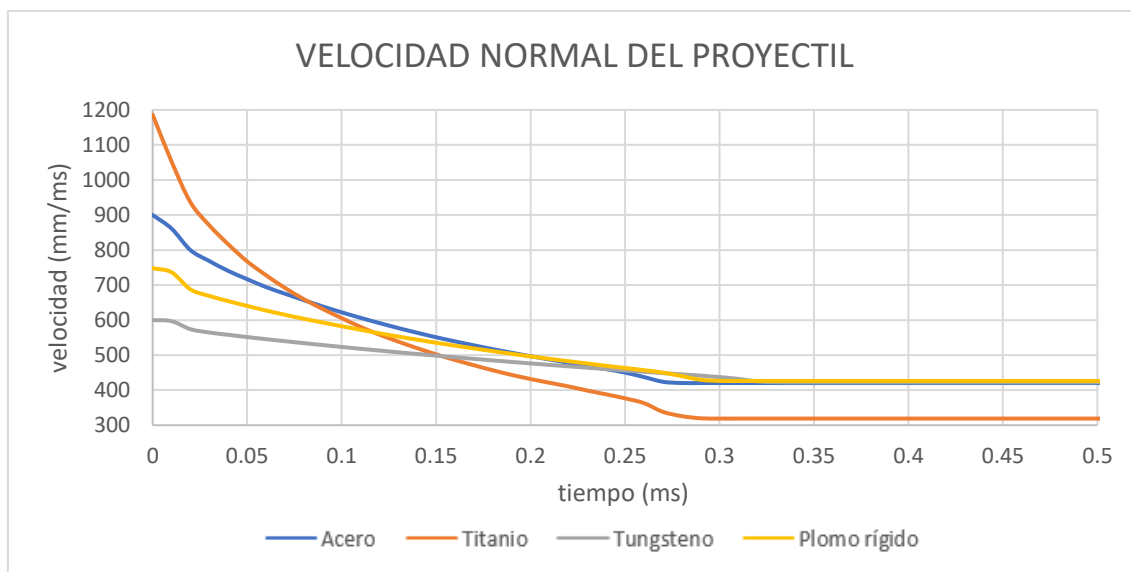
Se muestran la evolución de las velocidad para los dos porcentajes de llenado en el caso de energía cinética máxima en las Gráficas 4.4 y 4.5.

4.2.2.2.1 Llenado 100%



Gráfica 4.4 Evolución velocidad proyectiles y detalle mientras atraviesa el tanque (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.2.2.2 Llenado 75%



Gráfica 4.5 Evolución representativa de la velocidad proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.2.3 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA TRAYECTORIA Y VELOCIDAD DEL PROYECTIL

Con las gráficas del apartado 4.2.2 que determinan la evolución de la trayectoria y proyectil se observa que para los casos de llenado de 100% el proyectil a mayor velocidad de entrada es el que sufre un mayor descenso en su velocidad a la salida del tanque, incluso llegando a salir a velocidades inferiores a las del proyectil con menor velocidad, que posee mayor masa.

En los casos de 75% de llenado ocurre lo mismo pero se añade otro fenómeno, el de la desviación vertical, a la que denominamos cabeceo del proyectil debido a que la parte superior del tanque consta de agua y aire lo que implica que la masa es menor a la inferior, que es solo agua. Por lo tanto, cuando el proyectil atraviesa el fluido sufre una fuerza de empuje hacia arriba que hace que su trayectoria no sea totalmente horizontal sino con una componente vertical también. Esto provoca que el proyectil tenga una dirección de salida distinta a la de entrada, esta trayectoria final es ascendente según avanza.

A parte se puede observar el momento de entrada, el avance en el fluido y la salida del proyectil en el tanque, ya que la velocidad fuera del tanque disminuirá suavemente mientras se encuentre en el entorno mallado de aire, fuera de él la velocidad se mantendrá constante, es decir, una recta horizontal debido a que no se tiene en cuenta fuerzas externas de rozamiento solo en el volumen mallado que es atravesado en menos de 0.5 ms. Todo ello se aprecia con cambios de curvatura en las gráficas de la velocidad del proyectil y velocidad normal del proyectil. Esto mismo sucede en el eje vertical para las fracciones de llenado del 75%.

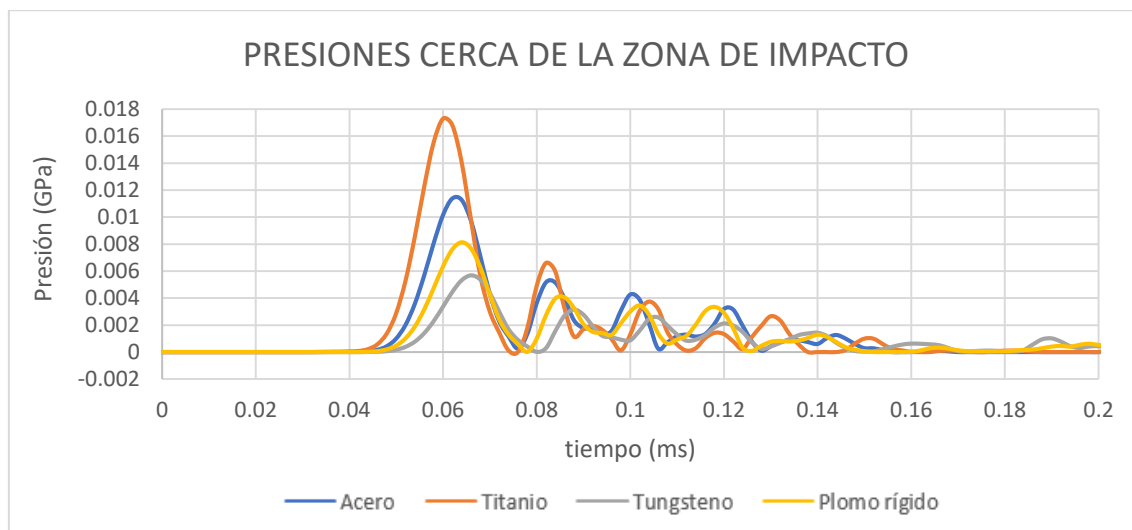
4.2.3 PRESIONES EN EL FLUIDO

En el apartado de las presiones del fluido se estudia la presión en dos puntos del tanque, donde se sitúan transductores de presión como en el modelo de acero estudiado en anteriores trabajos [2]. Esto permite ver el avance de las ondas de presión a lo largo del tanque, y cuando se estabilizan y se elimina la sobrepresión creada. Los dos transductores están colocados uno cerca de la zona de impacto y otro lejos, y se detallan su evoluciones a continuación. Para ello se ha hecho un promedio de la presión en varios puntos de esa zona.

4.2.3.1 PRESIONES CERCA DEL IMPACTO

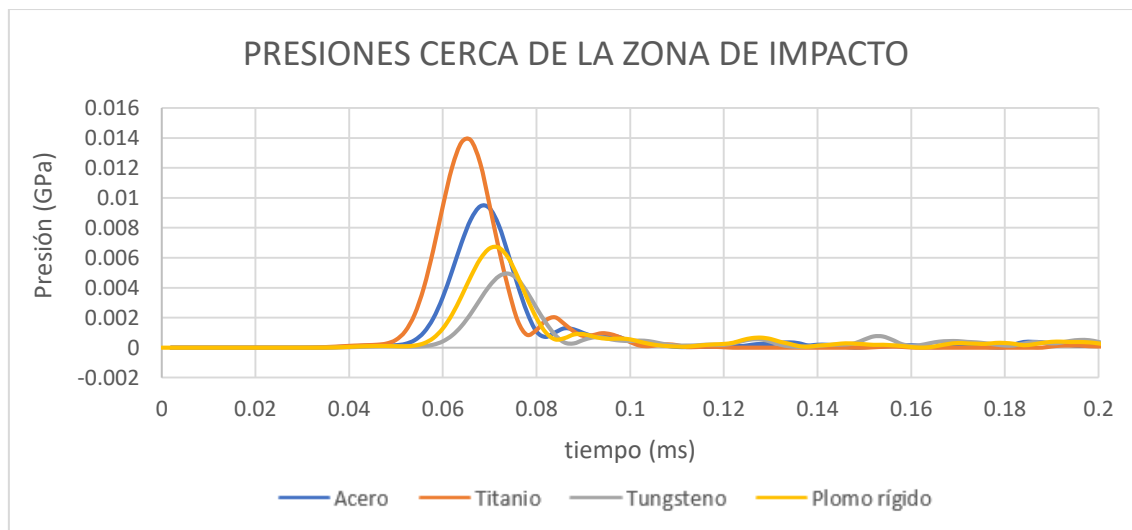
Se muestran las presiones cerca de la zona de impacto para los dos porcentajes de llenado en el caso de energía cinética máxima en las Gráficas 4.6 y 4.7.

4.2.3.1.1 Llenado 100%



Gráfica 4.6 Presiones cerca de la pared de impacto (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.3.1.2 Llenado 75%

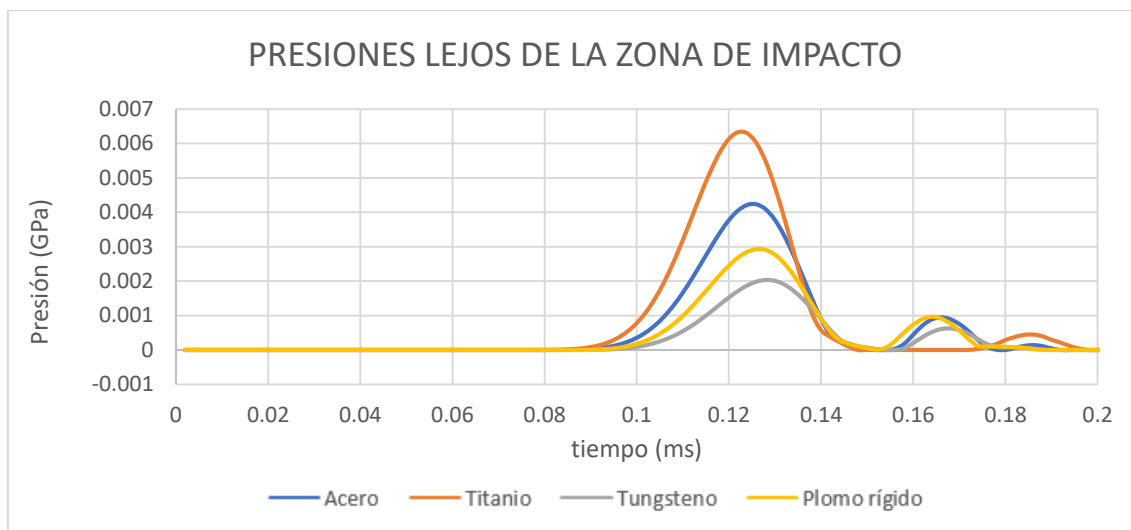


Gráfica 4.7 Presiones cerca de la pared de impacto (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.3.2 PRESIONES LEJOS DEL IMPACTO

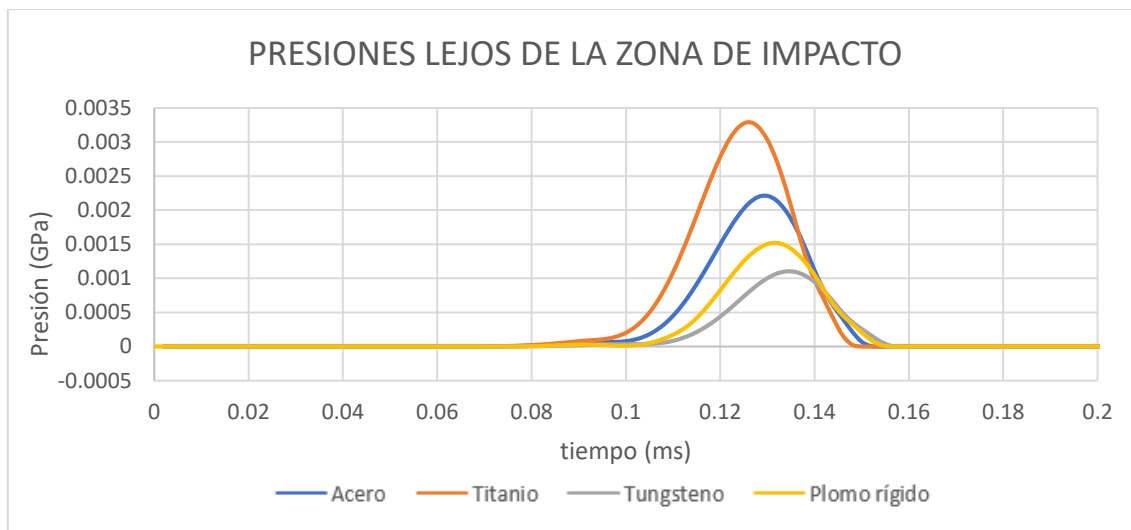
Se muestran las presiones lejos de la zona de impacto para los dos porcentajes de llenado en el caso de energía cinética máxima en las Gráficas 4.8 y 4.9.

4.2.3.2.1 Llenado 100%



Gráfica 4.8 Presiones lejos de la pared de impacto (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.3.2.2 Llenado 75%



Gráfica 4.9 Presiones lejos de la pared de impacto (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.3.3 ANALISIS DE RESULTADOS DE LAS PRESIONES DEL FLUIDO

Las presiones generadas en los puntos de medición que son cerca de la zona de impacto y lejos de la zona de impacto muestran que las presiones en las zonas cercanas al impacto son mayores en las dos fracciones de llenado que en las presiones obtenidas en las zonas lejanas a igualdad de energía cinética. Las presiones obtenidas en la fracción de llenado del 75% son ligeramente menores que en el tanque completamente lleno.

Otra cosa que se observa es que a menor velocidad más tarde se producen los picos de presión, ya que la onda provocada tras el impacto se desplazara más lenta, por eso a mayor velocidad del proyectil se obtienen presiones más altas.

Además se observa que los picos de presión son cíclicos con un periodo que va reduciendo al igual que el pico de presión máxima hasta que se estabiliza en la presión inicial.

4.2.4 DESPLAZAMIENTOS DE LAS PAREDES

En este punto se muestran las evoluciones de las deformaciones en las distintas paredes del tanque, permitiendo ver la influencia del material y la velocidad del proyectil a una misma energía cinética para dos fracciones de llenado, 75% y 100%. Las paredes de entrada y salida para la fracción de 100% poseen simetría en el punto medio de impacto por eso se mostrara solo la mitad, se aclarara concretamente para cada caso con una figura representativa de la pared analizada. Tambien sucede en las paredes de entrada y superior a lo largo para las dos fracciones de llenado.

Y las partes eliminadas de la pared tras el impacto aparecen con valor cero en la gráfica apreciándose un salto entre puntos sin ser una variación suave como es el resto de la pared.

Para comprender los signos de las deformaciones hay que explicar que las paredes tienden a deformarse en sentido exterior al fluido como se muestran en la Figura 4.9.

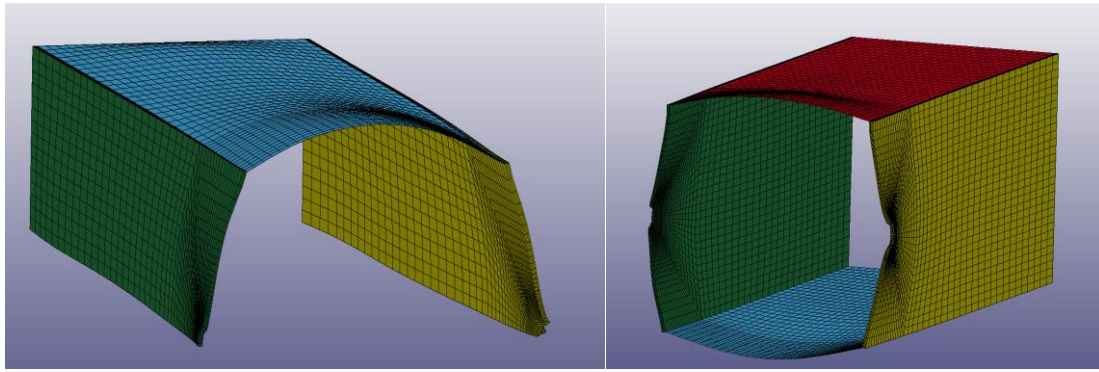


Figura 4.9 Deformación tanque al 100% (Izqda.) y al 75% (Drcha.)

4.2.4.1 DESPLAZAMIENTO PARED DE ENTRADA EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL

A continuación, se muestra el desplazamiento de la pared de entrada en dirección transversal del tanque llenado 100% y 75% (Ver Gráficas 4.10 y 4.11), para aclarar la pared a la que se hace referencia, y si se muestra completamente en cada porcentaje de llenado, se agrega una figura identificando la pared, como en las Figuras 4.10 y 4.11.

También hay que destacar que los desplazamientos de la pared con el tanque lleno al 75% en la parte donde hay aire serán menores que en los que se encuentran en contacto con el agua.

4.2.4.1.1 Llenado 100%

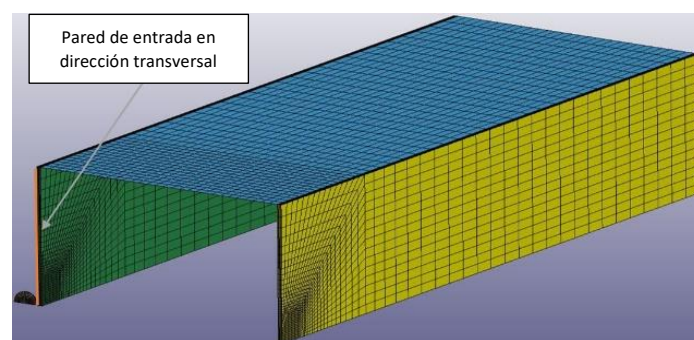
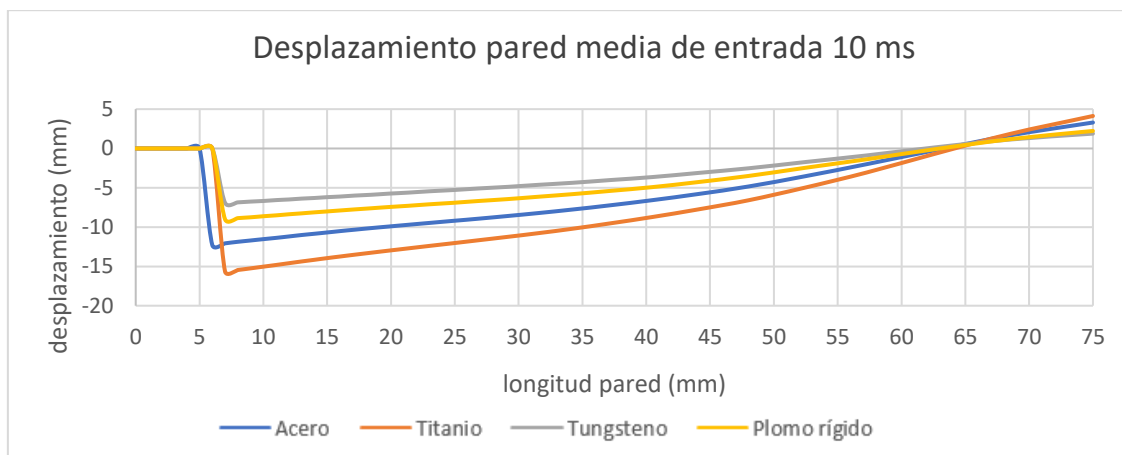


Figura 4.10 Pared de entrada en dirección transversal del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.



Gráfica 4.10 Desplazamiento de la pared de entrada en dirección transversal para todos los materiales, 10ms (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.4.1.2 Llenado 75%

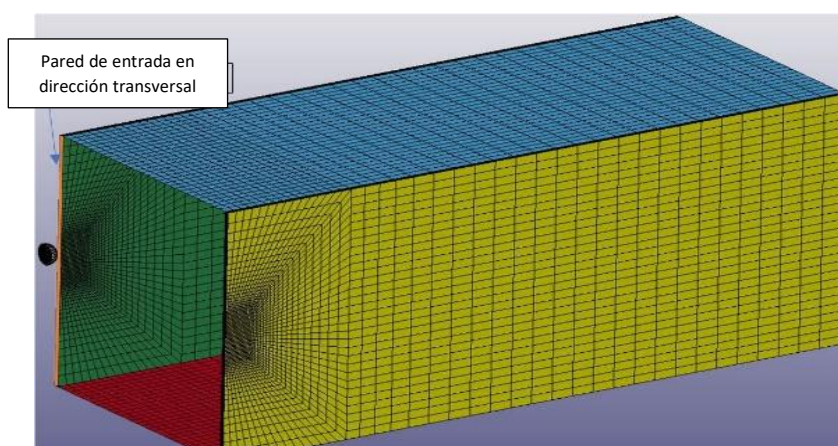
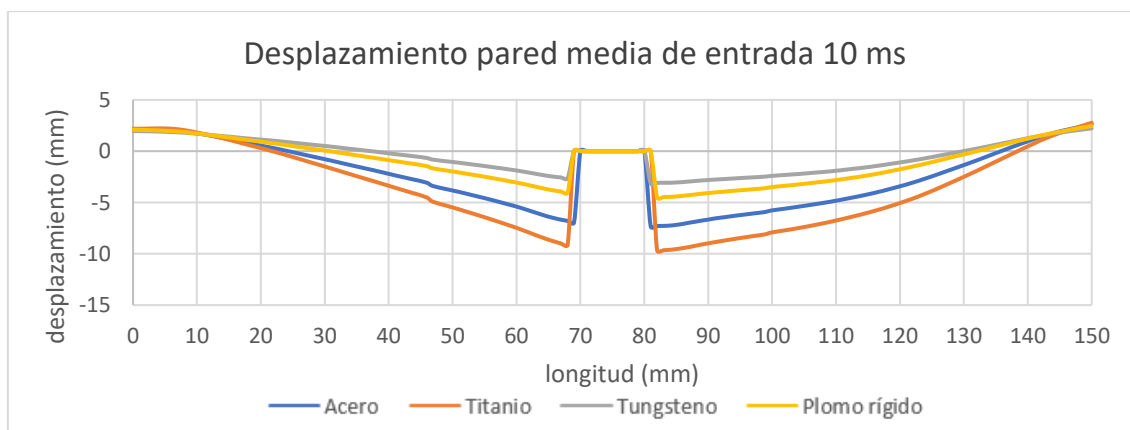


Figura 4.11 Pared de entrada en dirección transversal del tanque llenado al 75% cortado a un medio.



Gráfica 4.11 Desplazamiento de la pared de entrada en dirección transversal para todos los materiales, 10ms (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.4.2 DESPLAZAMIENTO PARED DE ENTRADA A LO LARGO DEL TANQUE

En este punto se muestra el desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque llenado 100% y 75%, en este último porcentaje se muestran los desplazamientos para los dos casos a distinta energía cinética (Ver Gráficas 4.12, 4.13 y 4.14), para aclarar la pared a la que se hace referencia, y si se muestra completamente en cada porcentaje de llenado, se agrega una figura identificando la pared, como en las Figuras 4.12 y 4.13.

4.2.4.2.1 Llenado 100%

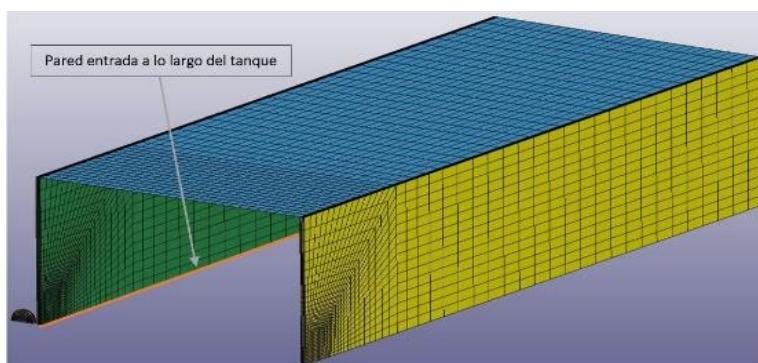
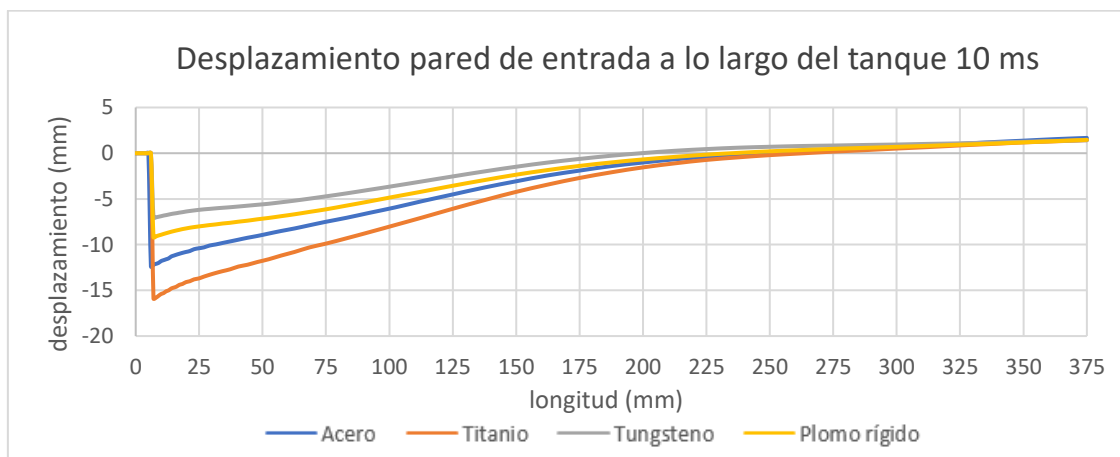


Figura 4.12 Pared de entrada lo largo del tanque llenado al 100% cortado a un medio.



Gráfica 4.12 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.4.2.2 Llenado 75%

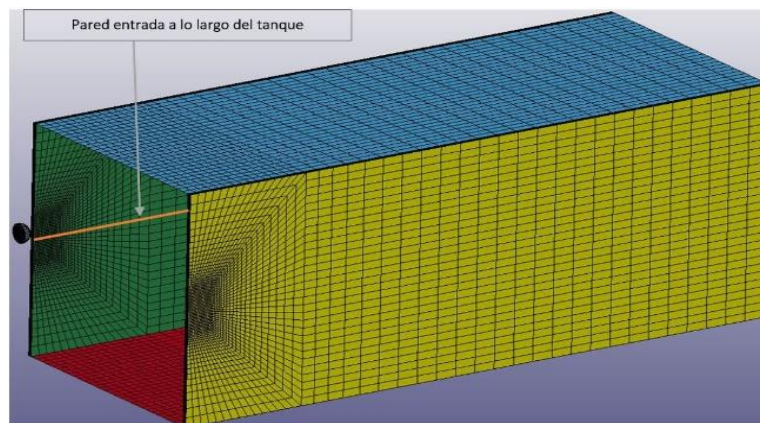
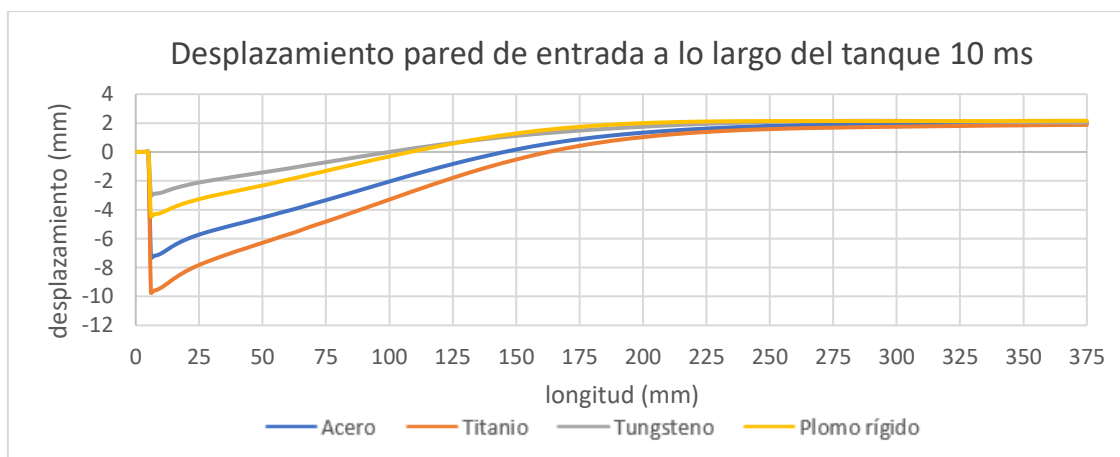
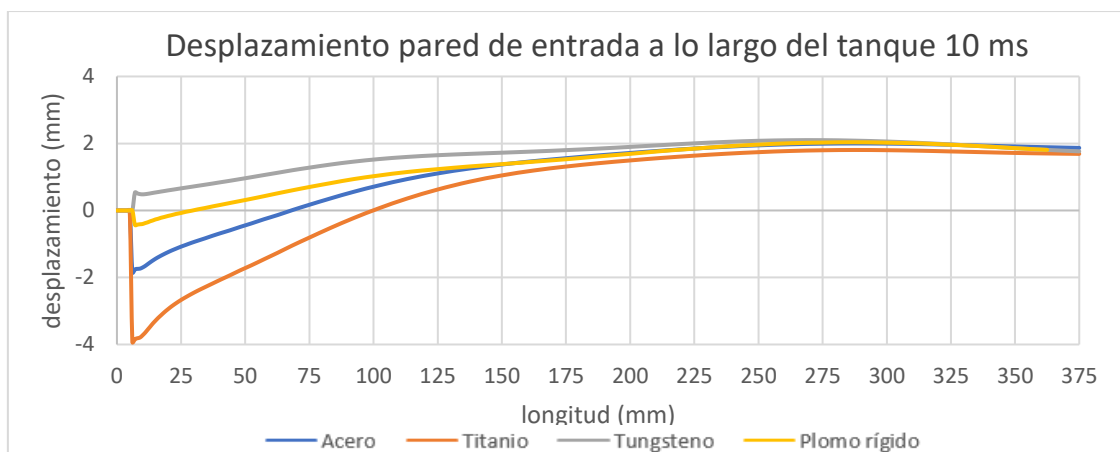


Figura 4.13 Pared de entrada a lo largo del tanque llenado al 75% cortado a un medio..



Gráfica 4.13 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).



Gráfica 4.14 Desplazamiento de la pared de entrada a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).

4.2.4.3 DESPLAZAMIENTO PARED DE SALIDA

El desplazamiento de la pared media de salida en el tanque llenado 100% y 75% se muestra en las Gráficas 4.15 y 4.16. Con el fin de aclarar la pared a la que se hace referencia, y si se muestra completamente en cada porcentaje de llenado, se agrega una figura identificando la pared, como en las Figuras 4.14 y 4.15.

También hay que destacar que los desplazamientos de la pared con el tanque lleno al 75% en la parte donde hay aire serán menores que en los que se encuentran en contacto con el agua.

4.2.4.3.1 Llenado 100%

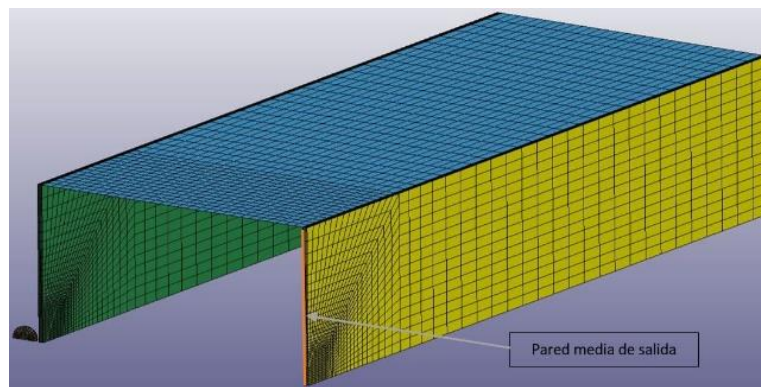
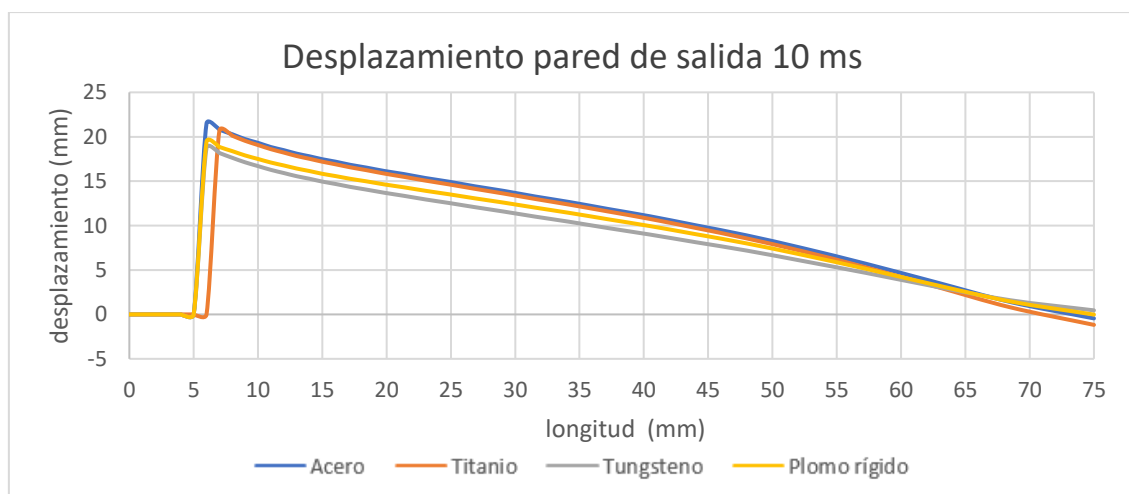


Figura 4.14 Pared media de salida del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.



Gráfica 4.15 Desplazamiento de la pared de salida para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.4.3.2 Llenado 75%

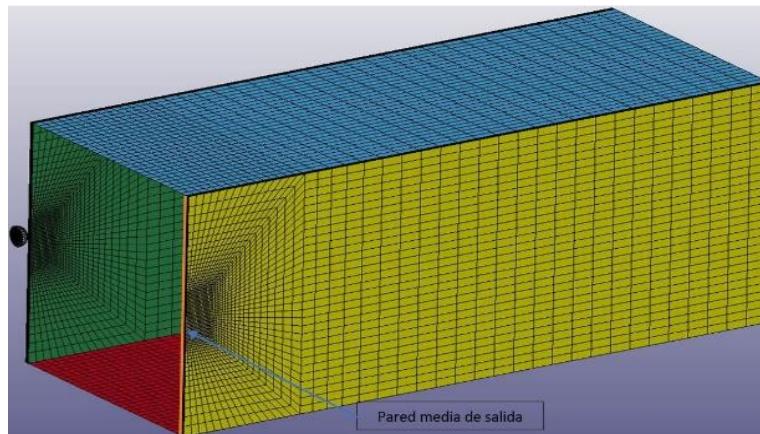
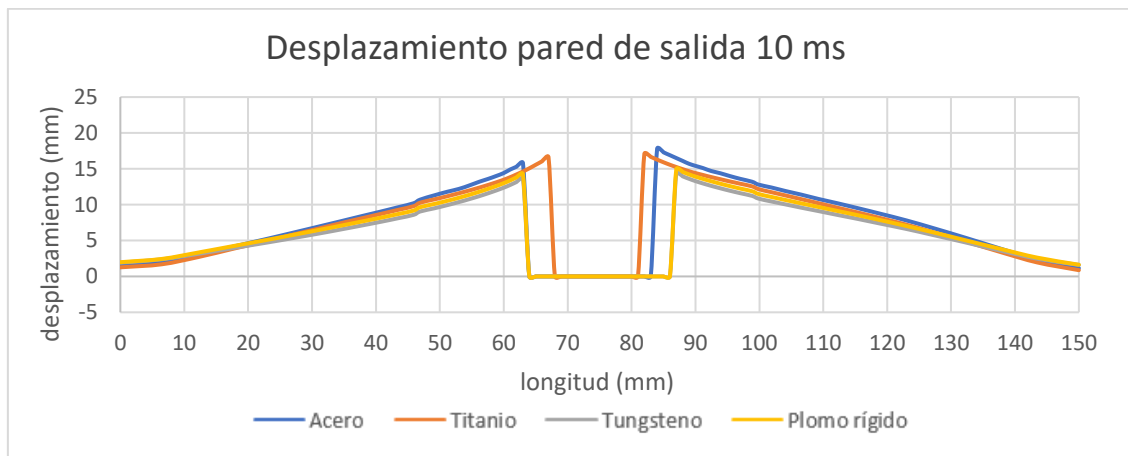


Figura 4.15 Pared media de salida del tanque llenado al 75% cortado a un medio.



Gráfica 4.16 Desplazamiento de la pared de salida para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.4.4 DESPLAZAMIENTO PARED SUPERIOR MEDIA

En este punto se muestra el desplazamiento de la pared superior media del tanque con los dos llenados diferentes, 100% y 75%, en este último porcentaje se muestran los desplazamientos para los dos casos a distinta energía cinética, ya que no son resultados similares (Ver Gráficas 4.17, 4.18 y 4.19). Para aclarar la pared a la que se hace referencia, y si se muestra completamente en cada porcentaje de llenado, se agrega una figura identificando la pared, como en las Figuras 4.16 y 4.17.

4.2.4.4.1 Llenado 100%

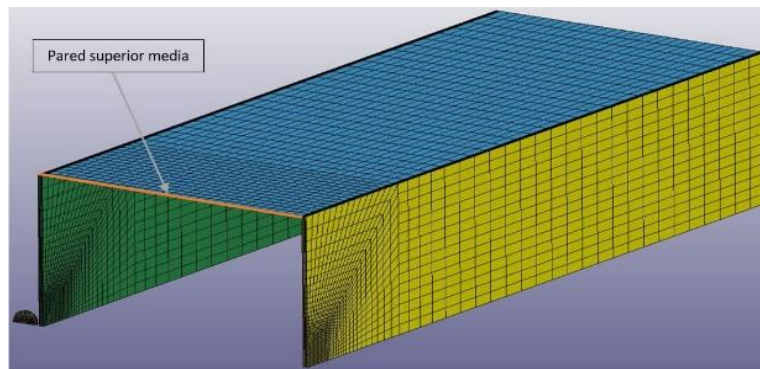
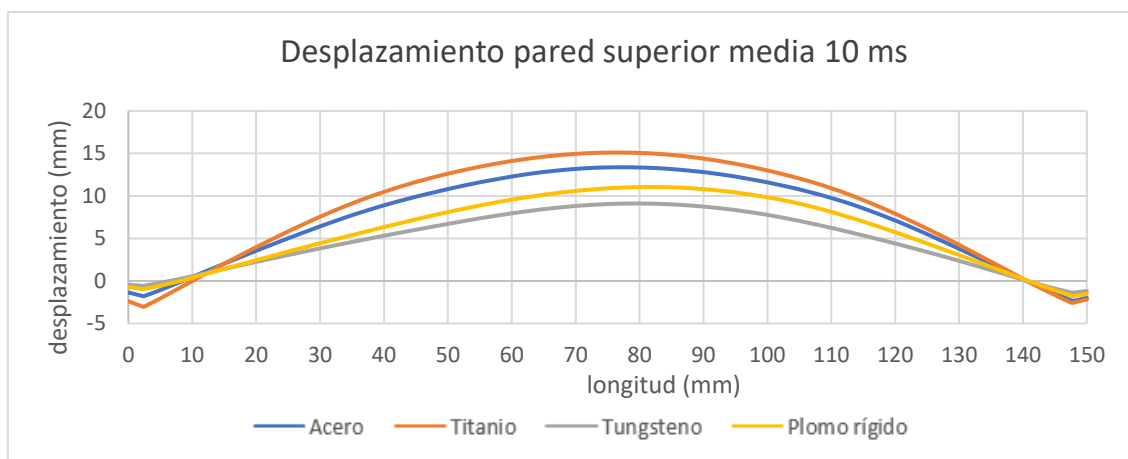


Figura 4.16 Pared superior media del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.



Gráfica 4.17 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).

Esta pared también corresponde a la pared inferior en el caso del llenado 100%.

4.2.4.4.2 Llenado 75%

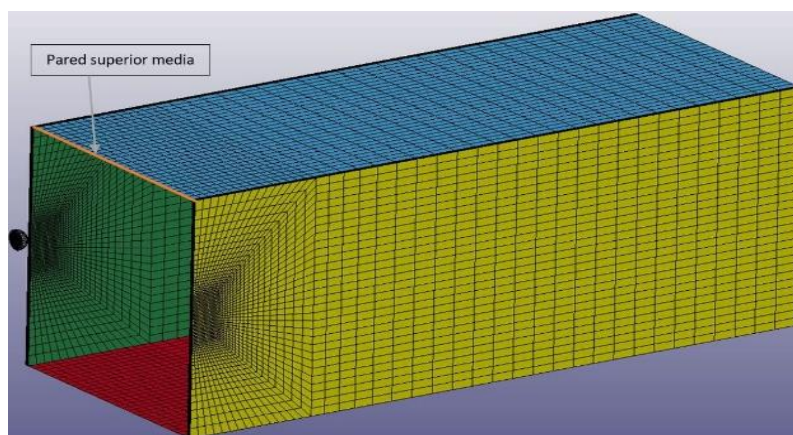
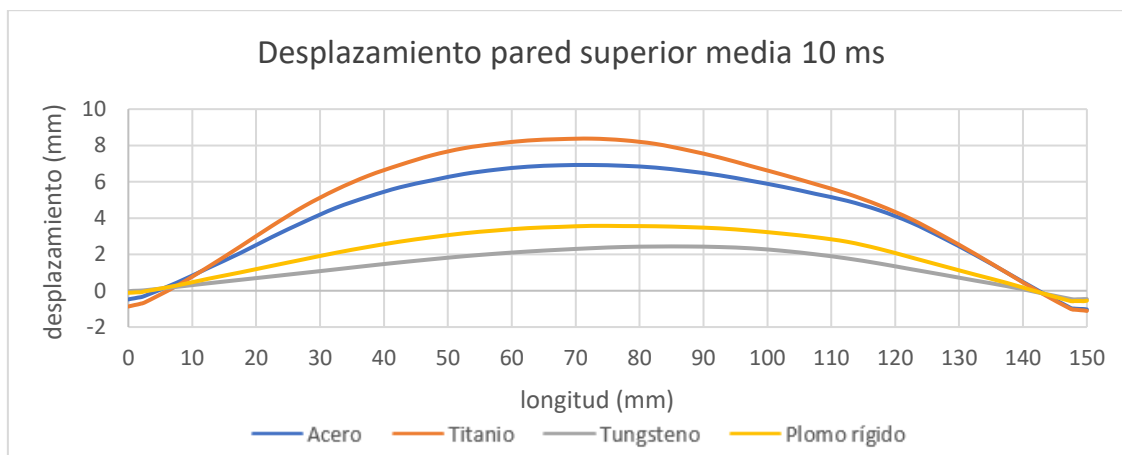
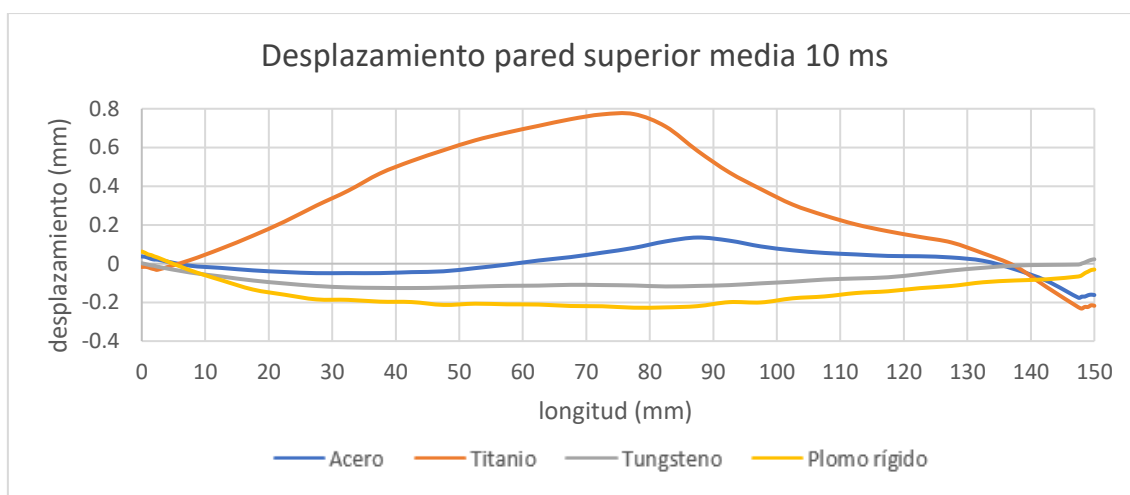


Figura 4.17 Pared superior media del tanque llenado al 75% cortado a medio.



Gráfica 4.18 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).



Gráfica 4.19 Desplazamiento de la pared superior para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).

4.2.4.5 DESPLAZAMIENTO PARED SUPERIOR A LO LARGO DEL TANQUE

En este punto se muestra el desplazamiento de la pared superior a lo largo del tanque llenado 100% y 75%, en este último porcentaje se muestran los desplazamientos para los dos casos a distinta energía cinética (Ver Gráficas 4.20, 4.21 y 4.22), para aclarar la pared a la que se hace referencia, y si se muestra completamente en cada porcentaje de llenado, se agrega una figura identificando la pared, como en las Figuras 4.18 y 4.19.

4.2.4.5.1 Llenado 100%

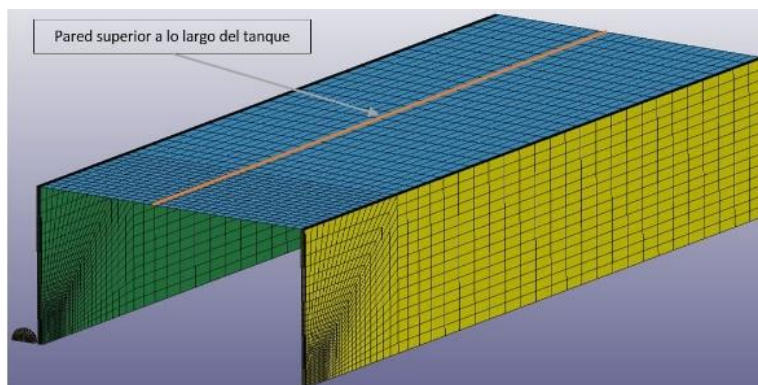
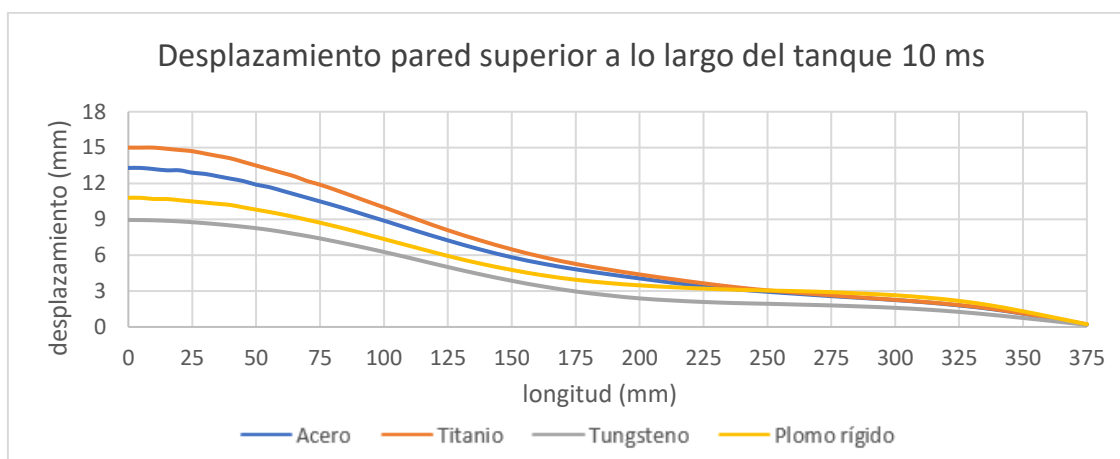


Figura 4.18 Pared superior a lo largo del tanque llenado al 100% cortado a un cuarto.



Gráfica 4.20 Desplazamiento de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 100%, energía cinética máxima).

4.2.4.5.2 Llenado 75%

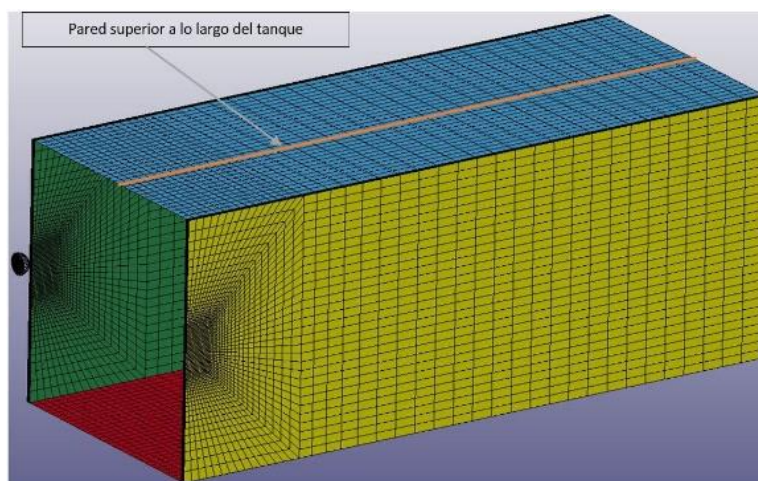
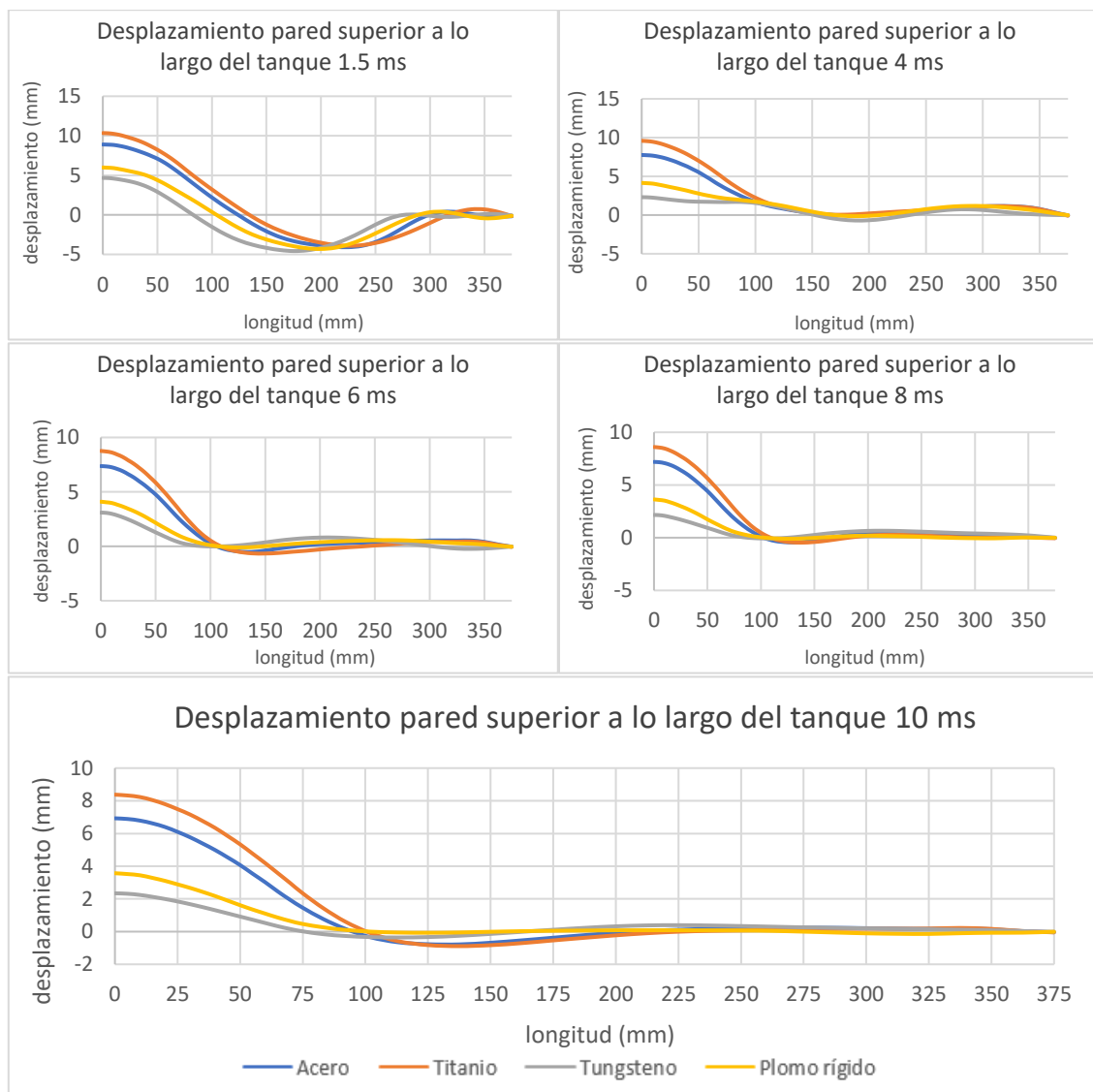
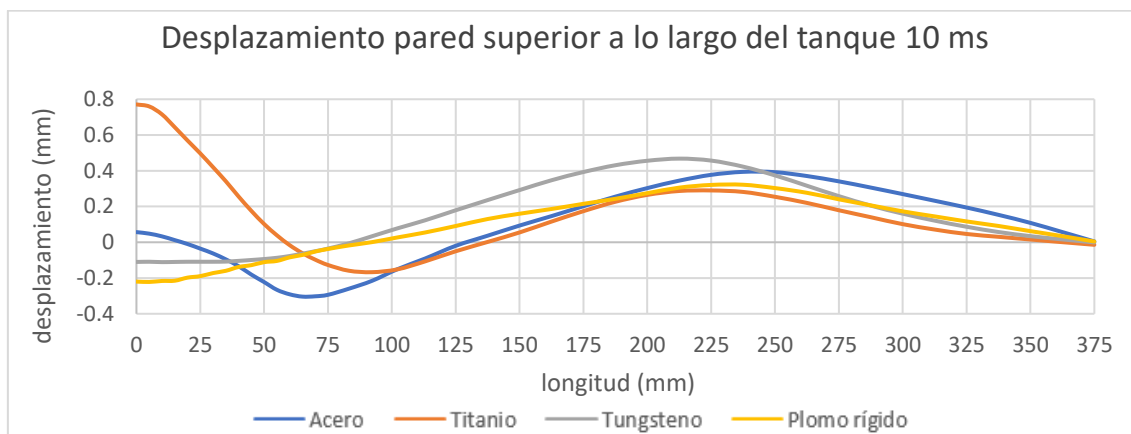


Figura 4.19 Pared superior a lo largo del tanque llenado al 75% cortado a un medio.



Gráfica 4.21 Evolución de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales (llenado 75%, energía cinética máxima).



Gráfica 4.22 Desplazamiento de la pared superior a lo largo del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética mínima).

4.2.4.6 DESPLAZAMIENTO PARED INFERIOR EN TANQUE LLENO AL 75%

En este punto se muestran los desplazamientos de la pared inferior media del tanque que solo se estudia en los casos del 75%, ya que en los casos de 100% la pared superior e inferior responden de la misma forma al fenómeno del Golpe Hidrodinámico. El comportamiento de las paredes del 75% de pared inferior media es similar en los dos casos diferentes de la energía cinética. Para ello se muestra en la Figura 4.20 la pared a la que se hace referencia y en la Gráfica 4.22 la deformada de la pared.

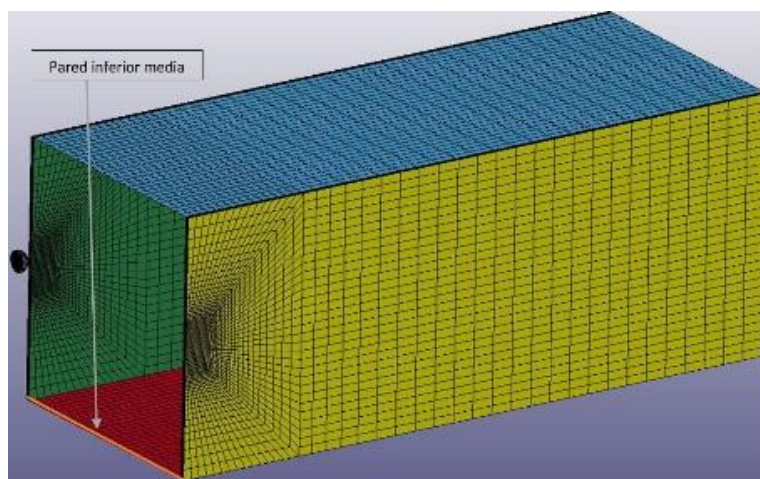
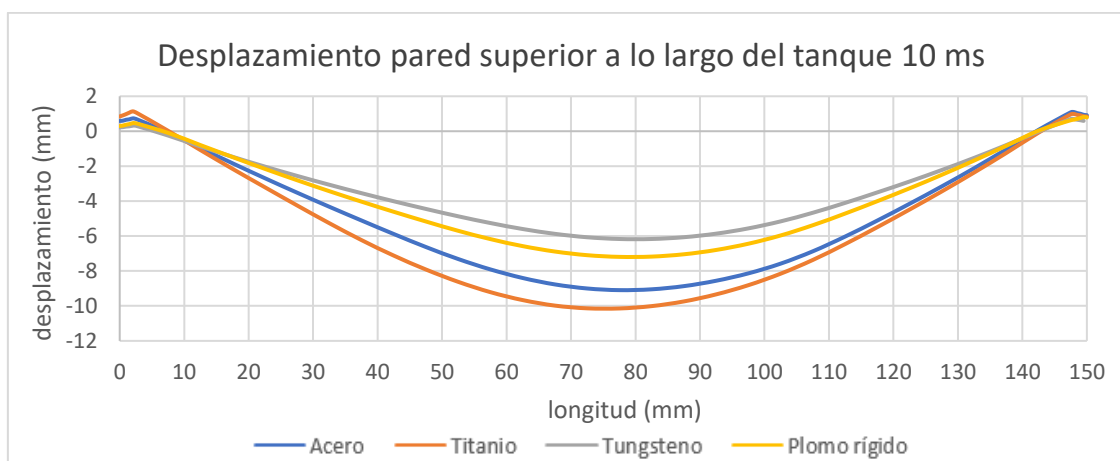


Figura 4.20 Pared inferior media del tanque llenado al 75% cortado a un medio.



Gráfica 4.23 Desplazamiento de la pared inferior del tanque para todos los materiales, 10 ms (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.4.7 DESPLAZAMIENTOS DE LAS PAREDES

Los desplazamientos de las paredes es un fenómeno estructural importante que permite determinar que impactos son los más catastróficos, para ello se comparan todas las paredes del plano de impacto, y la pared de entrada y superior a lo largo del tanque.

Tras observar los datos extraídos de las simulaciones que se encuentran en las gráficas anteriores se destacan las siguientes características:

- Las paredes más deformadas son las de los modelos de mayor velocidad.
- Los orificios de entrada son muy similares entre ellos pero los de salida son mayores en los materiales con mayor densidad, además la diferencia entre el desplazamiento según el material es menor en la salida que en la entrada, donde se aprecia una mayor afectación por la velocidad del proyectil.
- Las paredes que están en contacto con el aire interior sufren menores desplazamientos que las que están en contacto con el agua en los modelos del 75%. A parte las paredes superiores medias con el porcentaje de llenado al 75% en los dos casos diferentes de energía cinética difieren en su deformada, las causas por la que sucede esto sobre todo en los proyectiles más densos es que se transfiere menor energía al agua interna que no llega a golpear con la fuerza necesaria para producir deformaciones plásticas en las paredes superiores. Esto mismo sucede en la pared superior a lo largo del tanque que sufre desplazamientos menores y la deformada de la pared no es igual para los materiales, ya que la onda que se propaga es de menor magnitud, por eso las deformaciones son menores a 1 mm.
- Además las paredes de entrada y superior analizadas a lo largo del tanque sufren un desplazamiento más localizado hacia al centro del tanque en la fracción del llenado del 75%, por el contrario en las del 100% son a lo largo de toda su longitud con curvas con mayores valores pero más suaves.
- Las pared que sufre mayor desplazamiento en el plano del impacto es la pared de salida que sufre la pretensión y los desplazamientos por el proyectil, esta pretensión es la que se explicó al definir la fase de salida del Golpe Hidrodinámico.

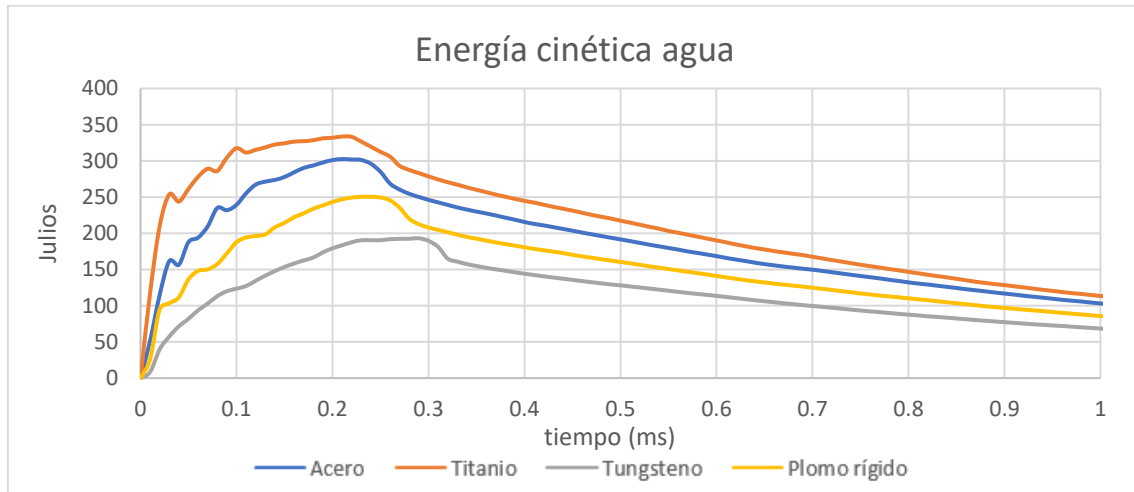
- Otro factor a destacar es que en los impactos con menor energía cinética hay velocidades muy bajas y no llegan a ser altas velocidades, y se podría necesitar mayor tiempo para la estabilización de los desplazamientos o simplemente no transfieren la suficiente energía para mover toda la masa de agua. Debido a que en este trabajo, y teniendo en cuenta trabajos previos [2] como el tiempo de computación de cada caso (más de 72 horas), se ha empleado un tiempo máximo de 10 ms. Hay que mencionar que en los trabajos referenciados donde se impactaba un tanque con una bola de acero, dicho tiempo era suficiente para conseguir la estabilización del desplazamiento de las paredes. Sin embargo en este trabajo se puede comprobar que, para conseguir el estado estacionario de las paredes en algunos casos sería necesario emplear un tiempo mayor. Esto ocurre en el caso de energía cinética menor con la fracción de llenado del 75% en materiales con densidad como el tungsteno o el material elástico con la densidad del plomo, ya que como se comentó son velocidades bajas en comparación con el acero y el tungsteno.
- La pared inferior media en todos los casos responde de la misma forma desplazándose más en velocidades más altas y con el porcentaje de llenado del 100%.
- También se observa que en las paredes de entrada y salida a lo largo de la dirección transversal en tanque con llenado al 75% se observan dos zonas de desplazamiento, la del agua que sufre mayor desplazamientos. Y la del aire que se encuentra en la parte superior de estas paredes y sufre menores desplazamientos.

Otro factor que hay que tener en cuenta a la hora de analizar los datos es que cuanto mayor tiempo pase del impacto mayor es la exactitud del valor de los desplazamientos, ya que el sistema se estabiliza y las deformaciones elásticas de las paredes desaparecen, es decir, parte del desplazamiento debido a esas deformaciones desaparece. De ahí que haya resultados que aumente en el tiempo y milisegundos más tarde disminuyan.

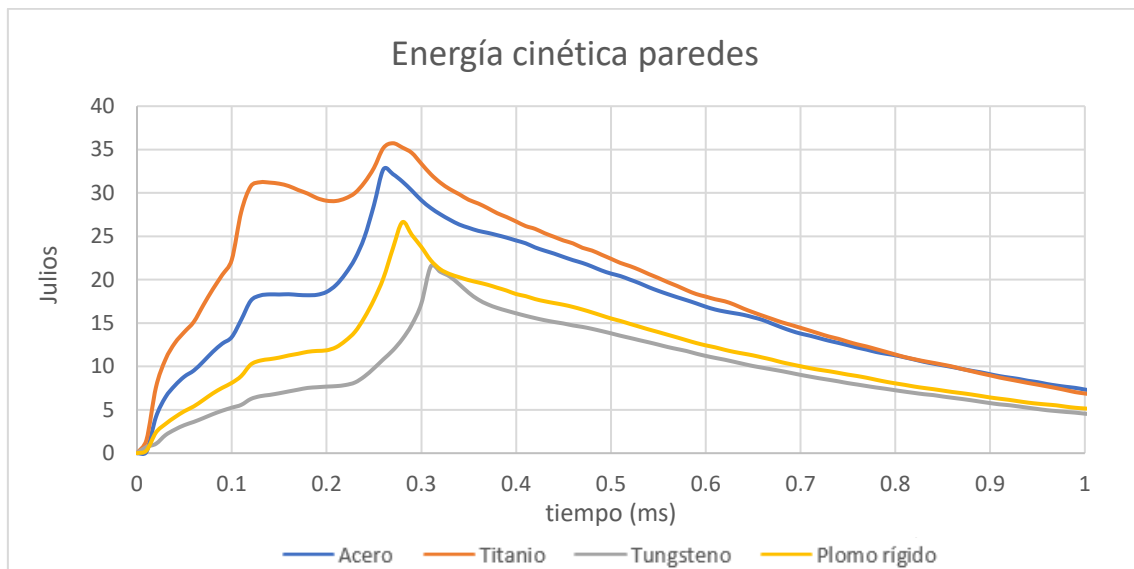
4.2.5 ENERGÍAS CINÉTICAS DEL SISTEMA

Las energías cinéticas analizadas son las transferidas entre el proyectil, las paredes de aluminio, los fluidos (agua y aire). Esto permite observar el balance de energía cinética durante los primeros instantes de impacto antes de comenzar a perder fluido del tanque.

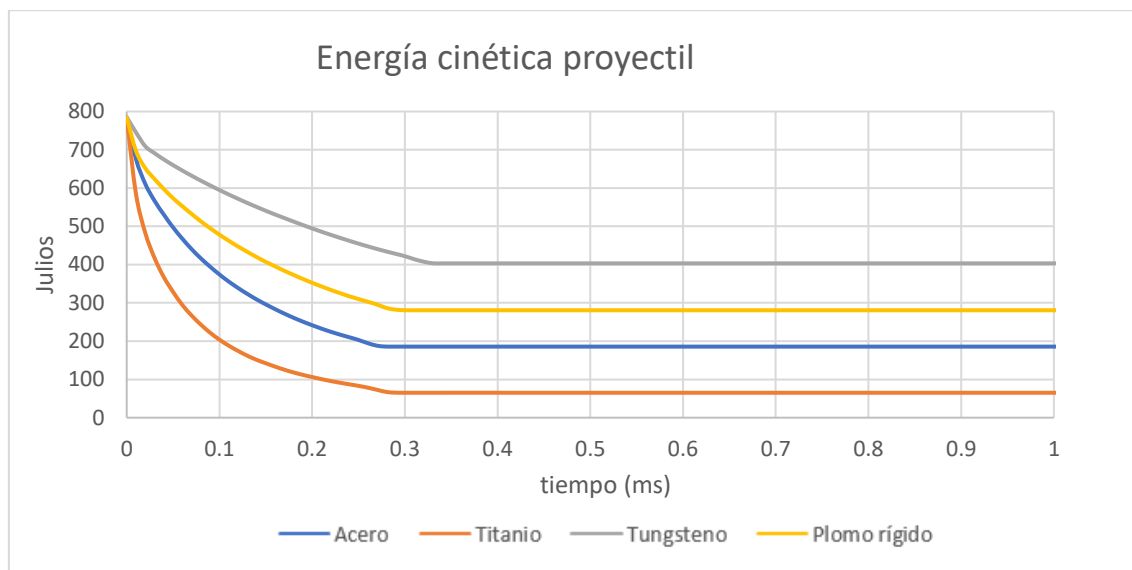
4.2.5.1.1 Llenado 100%



Gráfica 4.24 Energía cinética del agua (llenado 100%, energía cinética máxima).

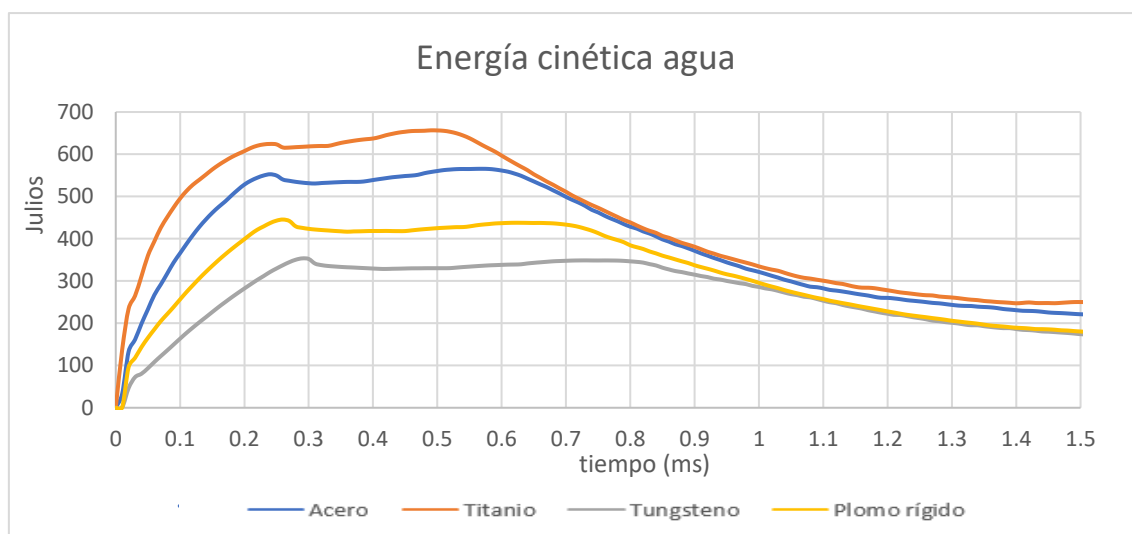


Gráfica 4.25 Energía cinética de las paredes (llenado 100%, energía cinética máxima).

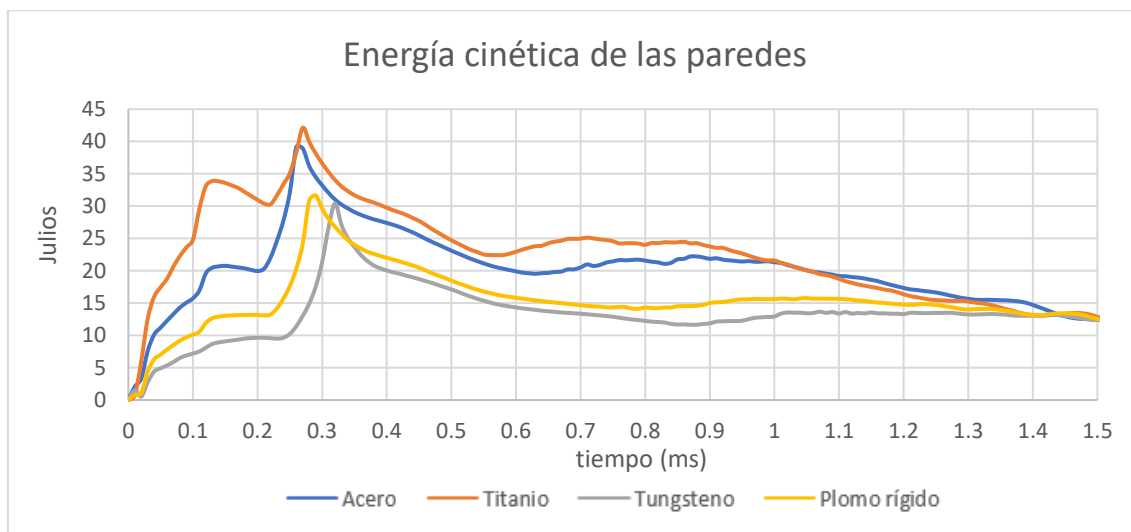


Gráfica 4.26 Energía cinética de los proyectiles (llenado 100%, energía cinética máxima).

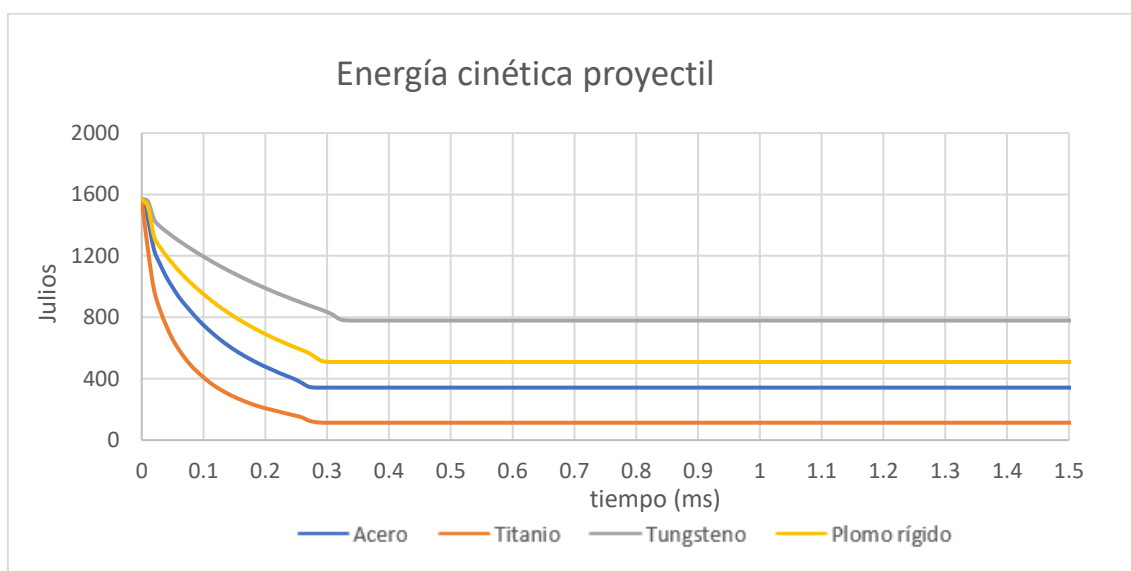
4.2.5.1.2 Llenado 75%



Gráfica 4.27 Energía cinética del agua (llenado 75%, energía cinética máxima).



Gráfica 4.28 Energía cinética de las paredes (llenado 75%, energía cinética máxima).



Gráfica 4.29 Energía cinética de los proyectiles (llenado 75%, energía cinética máxima).

4.2.5.2 ENERGÍAS CINÉTICAS DEL SISTEMA

Las energías cinéticas del agua paredes y proyectil son un interesante análisis, ya que se aprecia como el agua adquiere energía mientras el proyectil va atravesando el fluido y se lo trasmite a las paredes mientras avanza, a parte las paredes tambien reciben dicha energía durante el impacto. Pero el caso del llenado a 75% se aprecia como el agua posee un aumento, una caída en el valor y más tarde otro repunte hasta trasmitir la mayor parte de la energía a las paredes. Esto puede ser debido a que las paredes

almacenan energía durante el impacto y tras él se la devuelven al agua, para que más tarde esta se la devuelva como se ve en las Gráficas 4.27 y 4.28 en el llenado al 75%. Esto se observa en los dos casos de diferentes energía cinéticas, aunque en el de menor energía cinética este suceso es mucho menor.

Aunque esta característica necesita un estudio más exhaustivo con diferentes fracciones de llenado para poder afirmar la causa de esa variación de energía cinética en el agua en los primeros instantes de tiempo.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

Tras la realización de este trabajo fin de grado que tenía como objetivo ver la influencia de la velocidad en los impactos a una energía cinética constante en el fenómeno del Golpe Hidrodinámico, aparte de las cavidades creadas y los desplazamientos que se generan. Para ello se modifica el material y la velocidad del proyectil.

Tras ello, se seleccionan materiales de diversas densidades y se calculan las velocidades para mantener una energía cinética, y que sean lo suficientemente distintas. Así se puede establecer el comportamiento tras el impacto. Los materiales seleccionados en un principio eran el acero, que es el material validado en anteriores trabajos con las velocidades a las que se simuló en ellos, el tungsteno, el titanio y el plomo, pero debido a la deformación que sufría el plomo durante el impacto, la cual hacía variar la geometría del proyectil, se opta por la creación un material rígido ficticio con la densidad del plomo y un módulo de Young alto para que el proyectil durante el impacto no sufra variaciones en su geometría.

Con los materiales seleccionados se procede a llevar a cabo mediante el LS-DYNA las simulaciones con dos energías cinéticas distintas para determinar la evolución de los desplazamientos y del fenómeno del Golpe Hidrodinámico, con la creación de las cavidades, observando que la velocidad es el factor más influyente en las deformaciones. También se estudian otros datos como la velocidad, la trayectoria las energías cinéticas y las presiones. Y con estos datos obtenidos de las simulaciones se llega a las siguientes conclusiones:

- También se observa que los proyectiles con mayor velocidad ,es decir, los menos densos en los tanque parcialmente llenos sufren desviaciones en dirección vertical, además adquieren una velocidad en dicha dirección. Y se puede apreciar que ya no sigue una trayectoria totalmente horizontal.
- Otro aspecto de la velocidad final del proyectil es que a menor densidad o mayor velocidad inicial, siempre que se hable del mismo caso de energía cinética, el proyectil reduce más velocidad cuanto mayor es la velocidad inicial. La velocidad final llega incluso a ser menor en el proyectil con mayor velocidad inicial que en los demás casos.

- Con la medición de la presión máxima en el punto cercano de la zona de impacto para todos los materiales, se determina que mayor esta presión cuando mayor es la velocidad inicial. Además se observa que es ligeramente mayor en el tanque lleno al 100% cuando se compara para los casos de una misma energía cinética. Y al igual que en el punto cercano la presión máxima medida en la zona alejada al impacto en el tanque con el 100% de llenado es mayor que en el de llenado parcial. Por lo que a mayor velocidad se observa mayor presión.
- En las energías medidas en el sistema se ha detectado que para los casos parcialmente llenos la energía cinética del agua en los primeros instantes del impacto disminuye ligeramente para volver a aumentar un poco. Se determina que puede ser causado por la transmisión de energía de las paredes al agua porque también se aprecia una disminución en la energía de este, o una suma de causas como la anterior, que el proyectil este dentro y que la transmisión de movimiento entre la masa de agua y la velocidad de esta masa varíe, es decir, mueva más masa y la velocidad de dicha masa no varíe inversamente proporcional respecto a la otra, haciendo aumentar la energía cinética total del agua.
- Se ha determinado que a mayor velocidad mayores desplazamientos se producen, como se observa en los dos casos de las distintas energías cinéticas, esto es debido a que transfieren más energía al fluido en la fase en la que le atraviesa el proyectil, y esta energía después es transferida a las paredes. El aire interior disminuye los desplazamientos en las paredes en contacto con él, como se aprecia en la pared superior, y las paredes de entrada y salida a lo largo de la dirección transversal, esto solo sucede en los casos de llenado del 75%. En los modelos parcialmente llenos incluso si las velocidades no llegan a ser lo suficientemente altas, la parte superior no llega desplazarse de la misma forma que los casos anteriores al no llegar a impactar el agua interior en ella y no la desplaza. También se detecta que la cavidad que va desplazando la pared a lo largo del tanque en dirección a la pared de PMMA en el modelo totalmente lleno es mayor, tomando la forma de una curva que se va disminuyendo según se acerca a la pared de PMMA, y en el llenado al 75% se observan desplazamientos

están localizados en la parte central e inapreciables según se avanza a los extremos.

- Respecto a las cavidades también se determina que a mayor velocidad la cavidad es menor situado el proyectil en el mismo punto, debido a que este atraviesa el fluido más rápido no dando tiempo a que se expanda la cavidad, aunque con el tiempo esta será mayor.

Y con todos los datos analizados se puede concluir que el mayor daño estructural es causado cuando mayor es la velocidad y mayor es la densidad del proyectil para dimensiones similares.

5.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Con la conclusión de este proyecto se determina que la investigación del fenómeno del Golpe Hidrodinámico es muy complejo debido a la multitud de campos que es posible investigar para reducir los daños que provoca dicho fenómeno. Algunos de los temas a tratar en futuros trabajos son los siguientes:

- Modificación en la geometría del proyectil, así como los ángulos de impacto. Esto permitiría comparar resultados y con los obtenidos en este y anteriores trabajos y determinar que causas son las más dañinas, y así conseguir una solución o mitigación al problema.
- Probar con mayor variedades de fracciones de llenado que permitan estudiar el problema que se planteó al ver que el agua sufría una disminución y un aumento después de su energía cinética durante los primeros instantes de impacto.
- Diseñar nuevos tanques, variando su geometría, el material del que está hecho, añadirles elementos internos que refuercen la estructura o la permitan cierta deformación controlada o que mitiguen el efecto.

III. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Goicolea, «Estructuras sometidas a impactos,» Madrid, 2000.
- [2] D. Varas, «Estudio experimental y numerico del comportamineto de tanques integrados de combustible frente a impacto a alta velocidad,» Madrid, 2009.
- [3] D. Varas, P. Zaera y J. López , «Experimental study of fluid-filled aluminium tubes subjected to hihg-velocity,» *International Journal of Impact Engineering*, 2008.
- [4] E. A. Lundstrom y E. Stull, «Fluid dynamic analysis of Hydraulic Ram II (Results of experiments),» 1976.
- [5] K. J. Bates, «Aircraft fuel tank entry wall-projectile interaction studies,» Master thesis, NPS, 1973.
- [6] H. Power, «Fy 75 experimental hydraulic ram studies,,» NPS-57Ph75061, 1975.
- [7] S. Fahrenkrog, «A atudy of the crack damage in fuel-filled tank walls due to ballistic penetrators,» Master thesis, NPS, 1976.
- [8] S. J. Bless, P. F. Fry, J. P. Barber y R. K. Newman, «Studies of Hydrodynamic Ram Induced by High Velocity Spherical Fragment Simulators,» 1976.
- [9] S. J. Bless, «Fuel tank survivability for Hydrodynamic Ram induced by hihg-velocity fragments (Experimental results and design summary),» 1978.
- [10] A. Copland, «Hydrodinamic Ram attenuation,» US Army Ballistic Research Laboratory, 1983.
- [11] C. E. Sparks, R. L. Hinrichsen y D. Friedmann, «Comparisson and validation of Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) and Coupled Euler Lagrange (CEL) techniques for modeling Hydrodynamic Ram,» 2005.
- [12] J. G. Avery, «Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structure,» 1981.
- [13] E. A. Lundstrom y T. Anderson, «Hydraulic Ram model for hihg explosive ammunition, in: Symposium on Shock and Wave Propagation, Fluid-Structure Interaction and Structural Response,» de *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Honolulu, 1989.
- [14] C. M. Seddon , K. Modie, A. M. Thyer y M. Moatamedi, «Preliminary analysis of fuel tank impact,» 2004.
- [15] F. Poehlmann-Martins, J. Grabys y M. Souli, «Hydrodynamic Ramof non-exploding projectile impacting water,» de *ASME Pressure and Piping Division Conference*, Denver, Colorado, 2005.

- [16] M. Nishida y K. Tanaka, Experimental study of perforation and cracking of the water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres, 2006.
- [17] R. E. Ball, «Aircraft Fuel Tank Vulnerability to Hydraulic Ram: Modification of the Northrup Finite Element Computer Code BR-1 to include Fluid-Structure Interaction,» *Theory and User's Manual for BR-1HR*, pp. NPS-57B p74071, 1974.
- [18] R. E. Ball, «A Program for the Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Arbitrarily Loaded Shells of Revolution,» *Journal of Computers and Structure*, vol. 2, pp. 141-162, 1972.
- [19] E. A. Lundstrom , «Fluid/Structure Interaction in Hydraulic Ram,» 1977.
- [20] D. P. Ankeney, «Hydraulic Ram Structural Response,» de *Proceedings of the Hydrodynamic Ram seminar*, 1977.
- [21] R. M. Wada, Heitz y M. J. Jacobson, «Survivable design criteria for composite fuel tanks,» Naval Weapons Center.
- [22] W. M. Herlin y J. G. Avery, «Hydraulic Ram Structural Response computer program (HRSR),» Boeing Co, 1891.
- [23] Z. Rosenberg, S. J. Bless y J. P. Gallagher, «A model for Hydrodynamic Ram failure based on fracture mechanics analysis,» 1987.
- [24] S. J. Bradley y J. G. Avery, «Design guide for survivable structures in combat aircraft,» Air Force Aeronautical Laboratory, 1984.
- [25] T. Wierzbicki y N. A. Moussa, «Deformation and rupture of an aircraft fuel tank under Hydraulic Ram pressure loading,» 1992.
- [26] K. D. Kimsey, «Numerical Simulation of Hydrodynamic Ram,» Army Ballistic Research Laboratory, 1980.
- [27] C. Conde y E. Schiavi, «Métodos numéricos de resolución de ecuaciones no lineales,» pp. 37-50.
- [28] O. H. J, «A numerical procedure for three dimensionals impacts problems,» American Society of Civil Engineering.
- [29] I. Valadés y D. Varas, «Estudio numérico del efecto de atenuación del Golpe Hidrodinámico mediante placas metálicas,» Proyecto Fin de Grado, 2012.
- [30] Livermore Software Technology Coporation (LSTC), «LS-DYNA keyword user's manual R10.0,» vol. II, 2017.
- [31] D. Karagiozava y N. Jones , «Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact II: Structure response,» *International Journal of Impact Engineering*, 2004.
- [32] C. C. Yang, «Material Properties of Square Tube,» de *The 9th Fundamental Scientific Conference of Chinese Armed Forces Academy*, Taiwan, 2002.

- [33] M. Vesenjak, M. Matthaei, H. Mullerschön y Z. Ren, «Fluid models in LS-DYNA and their interaction with a structure in dynamic simulations,» de *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Denver, 2005.
- [34] L. M. Bresciani, A. Manes, T. A. Romano, P. Iavarone y M. Giglio, «Numerical modelling to reproduce fragmentation of a tungsten heavy alloy projectile impacting a ceramic tile: Adaptive solid mesh to the SPH technique and the cohesive law,» *International Journal of Impact Engineering*, 2016.
- [35] R. Boyd, R. Royles y K. M. M. El-Deeb, «Simulation and validation of UNDEX phenomena relating to axisymmetric structures,» Dearborn, 2000.